



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ BUDOV**

INSTITUTE OF BUILDING SERVICES

**PROUDĚNÍ VZDUCHU V UZAVŘENÉM  
PROSTORU BUDOVY**

AIR FLOW IN CLOSED SPACE

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

DIPLOMA THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

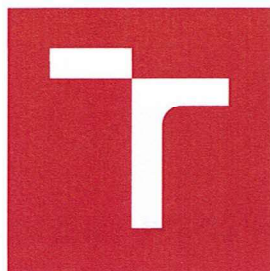
**Bc. Štěpán Jůza**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. ALEŠ RUBINA, Ph.D.**

**BRNO 2017**



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

STUDIJNÍ PROGRAM	N3607 Stavební inženýrství
TYP STUDIJNÍHO PROGRAMU	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
STUDIJNÍ OBOR	3608T001 Pozemní stavby
PRACOVISŤE	Ústav technických zařízení budov

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

DIPLOMANT	Bc. Štěpán Jůza
NÁZEV	Proudění vzduchu v uzavřeném prostoru budovy
VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE	doc. Ing. Aleš Rubina, Ph.D.
DATUM ZADÁNÍ	31. 3. 2016
DATUM ODEVZDÁNÍ	13. 1. 2017

V Brně dne 31. 3. 2016

doc. Ing. Jiří Hírš, CSc.  
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

1. Stavební dokumentace zadané budovy
2. Aktuální právní předpisy ČR
3. České i zahraniční technické normy
4. Odborná literatura
5. Zdroje na internetu

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ (ZADÁNÍ, CÍLE PRÁCE, POŽADOVANÉ VÝSTUPY)

### A. Analýza tématu, cíle a metody řešení

Analýza zadaného tématu, normové a právní podklady

Cíl práce, zvolené metody řešení

Teoretická rešerše proudění vzduchu v uzavřeném prostoru a distribuce vzduchu v praxi

### B. Aplikace tématu na zadané budově

Návrh technického řešení vnitřních rozvodů a koncových elementů vzduchotechniky do vybraného prostoru podle experimentálně zjištěných skutečností ve 2 variantách v zadané specializaci v rozsahu studie projektu s grafickými výstupy výkresů (půdorysy v měřítku min. 1:100) včetně technického popisu řešení a uvedeného porovnání výhod, či nevýhod obou variant

### C. Matematicko – fyzikální řešení a následné zpracování výsledků

Řešení využívající výpočetní techniku a modelování postihující zadanou problematiku. V rámci teoretické části práce budou provedeny matematické CFD modely charakterizující studentem řešenou problematiku včetně popisu a prezentace výsledků. Tyto budou využity v aplikaci tématu na zadaném vnitřním prostoru vybraného objektu.

## STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ/DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).



.....  
doc. Ing. Aleš Rubina, Ph.D.

Vedoucí diplomové práce

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce s názvem „Proudění vzduchu v uzavřeném prostoru“ v teoretické části řeší proudění vzduchu. Definují se zde základní druhy proudění, mezi něž patří i proudění v prostoru. Dále práce řeší metody pro popis proudu vzduchu. Praktická část se zabývá zhodnocením distribuce vzduchu vzduchotechnického systému s využitím CFD modelu. Dále řeší návrh druhé varianty distribuce vzduchu a porovnání změn, které nastaly. Konec praktické části přibližuje možnosti využití CFD modelu pro vytvoření mapy kvality prostředí a možnost sestavení variant výpočtů s měnícím se objemem přiváděného vzduchu.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

CFD model, stáří vzduchu, výměna vzduchu, objemové kritérium výměny vzduchu, mapa kvality prostředí, depozitář.

## **ABSTRACT**

Masters degree thesis with name “Air flow in closed space” in teoretical part describes air flow. Defined here basic types of flow including the flow in a closed space and the methods for the description of the air flow. The practical part deals with project evaluation distribution of air conditioning system using CFD model. Next solves a second variant of air distribution and compare the changes that have occurred. The end of the practical part approaching the possibility of using CFD model for creating the quality environment maps and the possibility to create variants of calculating with changing levels of the supply air.

## **KEYWORDS**

CFD model, age of air, air exchange, volume criterion of air exchange, map environmental quality, depository.

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP**

Bc. Štěpán Jůza *Proudění vzduchu v uzavřeném prostoru budovy*. Brno, 2017. 65 s., 5 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technických zařízení budov. Vedoucí práce doc. Ing. Aleš Rubina, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 11. 1. 2017



---

Bc. Štěpán Jůza  
autor práce

### **Poděkování:**

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Aleši Rubinovi, Ph.D. za cenné rady při konzultacích. Dále děkuji Ing. Petru Andrysovi, Ing. Jiřímu Ellovi a Ing. Ondřeji Jelinkovi Ph.D. za užitečné rady a odbornou konzultaci promoji práci. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině za poskytovanou podporu.

# OBSAH

<b>ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
<b>1 TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>12</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>13</b>
1.1 POPIS PROUDĚNÍ VZDUCHU .....	13
1.2 HLAVNÍ FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ PROUDĚNÍ VZDUCHU V MÍSTNOSTI .....	13
1.2.1 RYCHLOST VZDUCHU U VÝÚSTKY .....	13
1.2.2 GRAVITAČNÍ A VZTLAKOVÉ SÍLY .....	20
1.2.3 GEOMETRIE MÍSTNOSTI .....	21
1.2.4 POHYB LIDÍ A PŘEDMĚTŮ .....	23
1.3 MOŽNOSTI ŘEŠENÍ PROUDĚNÍ VZDUCHU .....	24
1.3.1 ANALYTICKÉ .....	24
1.3.2 EXPERIMENTÁLNÍ .....	27
1.3.3 EMPIRICKÉ .....	28
1.3.4 CFD .....	29
1.4 ZÁVĚR .....	31
<b>2 PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>32</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>33</b>
2.1 ANALÝZA PROJEKTU .....	33
2.2 HODNOCENÍ DISTRIBUCE VZT SYSTÉMU .....	34
2.2.1 SESTAVENÍ MODELU PRO CFD .....	34
2.2.2 ZKOUMANÝ PARAMETR VNITŘNÍHO PROSTŘEDÍ .....	38
2.2.3 POPIS PRVNÍ VARIANTY .....	40
2.2.4 VÝSTUPY Z PRVNÍ VARIANTY .....	40
2.2.5 DRUHÁ VARIANTA – POPIS ZMĚN .....	41
2.2.6 VÝSTUPY .....	41
2.2.7 SROVNÁNÍ DVOJICE VARIANT .....	42
2.3 SESTAVENÍ MAPY KVALITY PROSTŘEDÍ V PROSTORU .....	49
2.4 VLIV ZMĚNY PRŮTOKU VZDUCHU NA KVALITU PROSTŘEDÍ .....	52
<b>3 ZÁVĚR .....</b>	<b>60</b>
<b>4 POUŽITÉ ZDROJE .....</b>	<b>61</b>
<b>5 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A OZNAČENÍ .....</b>	<b>63</b>
<b>6 SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ .....</b>	<b>64</b>
<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>66</b>



## **ÚVOD**

Tato diplomová práce pojednává o proudění vzduchu v uzavřeném prostoru. Teoretická část se věnuje popisu proudění vzduchu a popisu druhů proudění vzduchu. K jednotlivým druhům proudění přiřazuje druh distribučního elementu a zhodnocuje k jakému účelu je tento druh distribuce vhodný. Dále jsou zde uvedeny metody pro popis proudění a následný návrh distribuce vzduchu.



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ BUDOV**

INSTITUTE OF BUILDING SERVICES

**TEORETICKÁ ČÁST**

## ÚVOD

Teoretická část přibližuje druhy proudění vzduchu a způsoby popisu proudění. Uvádí možnosti, jakými jsme schopni analyzovat teoretické proudění v řešeném prostoru a tak navrhnout ideální parametry pro distribuci vzduchu v praxi.

Proudění lze popsat jako pohyb tekutiny, který nastává ve směru proudění a zároveň se tekutina pohybuje svým neustáleným pohybem. Princip pohybu tekutiny je dán prouděním z místa s vyšším tlakem (tlaková potenciální energie) do místa s nižším tlakem. [10]

### 1.1 Popis proudění vzduchu

Proudění vzduchu vychází z poznatků o zákonu zachování hmoty a energie spolu s druhým pohybovým zákonem. (*Druhý Newtonův pohybový zákon - zákon síly: Jestliže na těleso působí síla, pak se těleso pohybuje se zrychlením, které je přímo úměrné působící síle a nepřímo úměrné hmotnosti tělesa.*) [9]

Proudění vzduchu může být vyvoláno mechanickou silou, působením gravitační síly nebo vztlačky. Mechanickou silou způsobující proudění vzduchu je pohyb lopatek ventilátoru. Gravitační síly jsou způsobeny rozdílem teplot, případně rozdílem koncentrací látek, ze kterých je vzduch tvořen.

Popis proudění je významnou úlohou pro návrh optimálního systému vzduchotechniky. Proudění je zásadní charakteristika výsledného stavu mikroklimatu v místnosti. Jedním ze základních parametrů proudění je rychlost v libovolném místě. Charakter proudění je důležitý pro stanovení rychlosti proudění v obytné zóně, která se nachází ve výšce 1,6-2m nad podlahou.

### 1.2 Hlavní faktory ovlivňující proudění vzduchu v místnosti

#### 1.2.1 Rychlost vzduchu u výústky

Rychlost vzduchu u výústky je nejvýznamněji ovlivněna množstvím přiváděného vzduchu a parametry distribučního elementu. Druhem distribučního elementu můžeme určit, zda se bude jednat o výústku s vysokou, střední či nízkou výtokovou rychlostí a o jaký tvar výstupního proudu vzduchu se bude jednat. (Kruhový, ovově symetrický, plochý, radiální...)

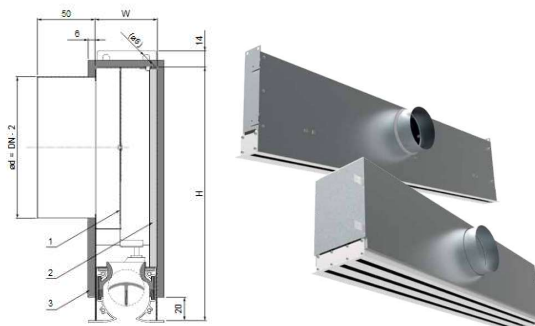
### ***Proudění s vysokou výtokovou rychlostí***

Jedná se o systém větrání se soustřednými proudy neboli bezpotrubní vedení přívodního vzduchu. Hlavní zástupcem výustek s vysokou výstupní rychlostí jsou dýzy a štěrbiny. Dýzy jsou představiteli distribučních elementů s kruhovým kompaktním proudem. Dýzy využívají setrvačné energie proudu vzduchu tak, aby proud vzduchu mohl působit co možná nejdále od výustky. Toto řešení je nutné hlavně při ofukování velkých ploch prosklených fasád ve vstupních halách nebo v jiných architektonických případech velké prosklené plochy. Další možnost použití dýz je při větrání vysokých hal (letišť, výrobní haly, sklady) a obchodních domů. Díky velkému dosahu proudu vzduchu je možné ponechat výustky ve velké výšce nad podlahou a tím nenarušovat otevřenou dispozici.

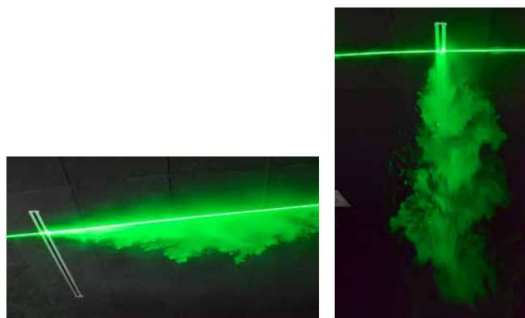


**Obrázek 1** Ukázka distribučního elementu dýza umístěného na stěně

Štěrbínové výustky se nejčastěji využívají na větrání prosklených ploch u dispozic s nižší výškou. Tento druh distribučních elementů pracuje s nižšími objemovými průtoky než dýzy, a proto dosahuje nižších dosahů proudu vzduchu. Výhodou je ovšem tvar vystupujícího proudu, který je plochý. Plochý proud zaručuje vhodnější omývání prosklených ploch.



**Obrázek 2** Ukázka distribučního elementu štěrbinová výustka

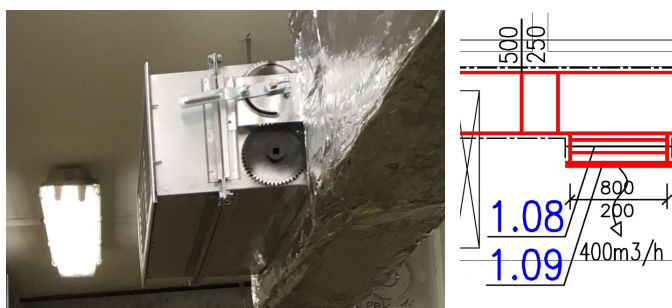


**Obrázek 3** Ukázka kouřové zkoušky štěrbinové výústky se znázorněním vystupujícího proudu vzduchu

### ***Proudění se střední výtokovou rychlostí***

Proudění se střední výstupovou rychlostí je typické pro zástupce distribučních elementů jako jsou obdélníkové výústky a anemostaty. Jedná se o směšovací větrání, kdy přívod větracího vzduchu pracuje s výraznou intenzitou směšování s okolním vzduchem.

Obdélníková výústka je příkladem proudění s kompaktním proudem. Na rozdíl od dýz se nejedná o osově symetrický proud vzduchu. Obdélníková výústka je často užívána v praxi pro větrání pohledově méně exponovaných míst jako například nízkých skladů či technických místností. Výhodou je možnost jejich umístění přímo na vzduchotechnické potrubí. Při umístění přímo na potrubí je nutné dbát na zajištění možnosti regulace. Ta je možná vestavěným regulačním ústrojím, regulační klapkou, na které bude teprve obdélníková výústka osazena, případně kombinací obou způsobů regulace.



**Obrázek 4** Ukázka čtyřhranné klapky se zdvojenou regulací - realizováno v prostoru depozitáře

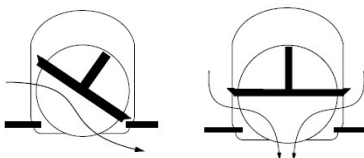
Výhodou u obdélníkových klapek je snadná možnost nastavení lamel pro změnu směru proudu. V drtivé většině případů k tomuto dochází až při nedodržení rychlostí vzduchu v pobytové zóně a následným vznikem obtěžujícího průvanu. Většinou se lamely nechávají v původním nastavení. Tento proud vzduchu je oproti proudu vycházejícího z dýz s výrazně nižší výtakovou rychlostí. Díky tomu

dříve dochází k turbulentnímu mísení se vzduchem v místnosti a tak je dosah tohoto proudu podstatně nižší. Omezený dosah proudů tak vyžaduje důraz na vhodné umístění těchto distribučních elementů v místnosti pro dosažení vhodného provětrání.

Hlavním představitelem koncových elementů s využitím radiálního proudění je anemostat. Jedna z možností provedení vířivého anemostatu je sestava tvořená plenum boxem a krycí deskou s otvory osazené nastavitelnými lamelami. Tento koncový element nám dovoluje změnou nastavení úhlu lamel dosáhnout různého úhlu proudu výstupního vzduchu. V praxi se jedná o časově zdlouhavé nastavování lamel, které se definuje při prvním nastavení, případně se nechá nastavení od výrobce.

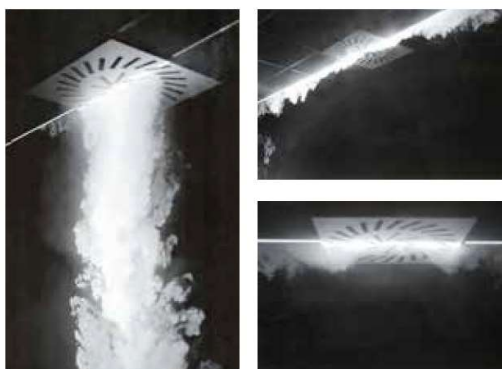


**Obrázek 5** Ukázka distribučního elementu vířivý anemostat

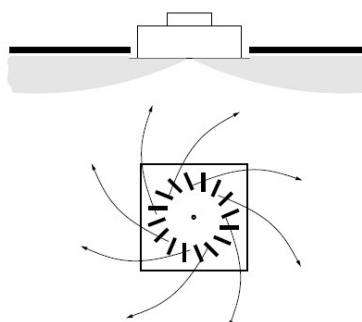


**Obrázek 6** Možnosti nastavení přívodních lamel pro nasměrování proudu vzduchu - radiální / kompaktní proud

Radiální proudění nastává, pokud se úhel proudu výstupního vzduchu pohybuje okolo  $180^\circ$ , tedy proud vzduchu je čistě podstropní. Znázornění pomocí kouřové zkoušky lze pozorovat na obrázku 7 na pravé straně. Tento druh proudění od vyústek se vyskytuje u klimatizování budov s malou světlou výškou (administrativní budovy) a pro přívod chladného vzduchu. Chladný vzduch je vhodné přivádět právě tímto způsobem, aby se dodržela rychlost proudění vzduchu v pobytové zóně. Chladný vzduch vlivem gravitačních sil klesá k podlaze a tak zvyšuje svoji rychlost proudění v pobytové zóně. Přivedení chladného proudu vzduchu vířivým anemostatem po krátké vzdálenosti vymizí rychlost proudu daná setrvačností a chladný vzduch klesá až do úrovně pobytové zóny.



**Obrázek 7** Ukázka kouřové zkoušky vířivého anemostatu pro přívod studeného a teplého vzduchu



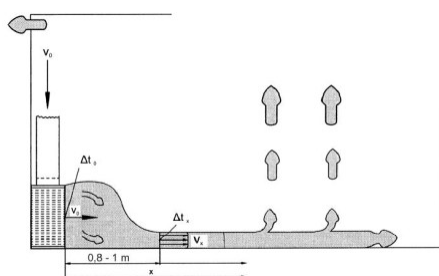
**Obrázek 8** schematické znázornění radiálního proudu vzduchu vystupujícího z vířivého anemostatu

### ***Proudění s nízkou výtokovou rychlostí***

Tyto vyústky přivádí do pobytové zóny upravený vzduch malou rychlostí do 0,5m/s. Hlavními zástupci této kategorie jsou velkoobjemové vyústky. Jedná se o zaplavovací systém distribuce kdy distribuční element je umístěn u podlahy a přiváděný vzduch zaplavuje pobytovou zónu upraveným vzduchem. Při tomto způsobu distribuce prakticky nevzniká cirkulace vzduchu v místnosti. Pohyb vzduchu je zajištěn konvektivními proudy vznikající kolem zdrojů tepla v místnosti. (osoby, vybavení, technologie) Tento způsob je vhodný pouze pro chlazení prostorů a to z důvodu, že přiváděný vzduch musí přilnout k podlaze. Přilnutí k podlaze zajišťují gravitační síly, které působí na chladnější vzduch. Přiváděný vzduch je zpravidla o 1 až 3 K chladnější než vzduch v místnosti.

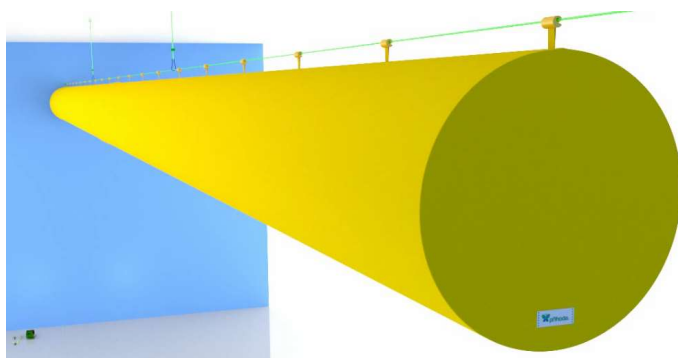


**Obrázek 9** Ukázka distribučního elementu velkoobjemová vyústka



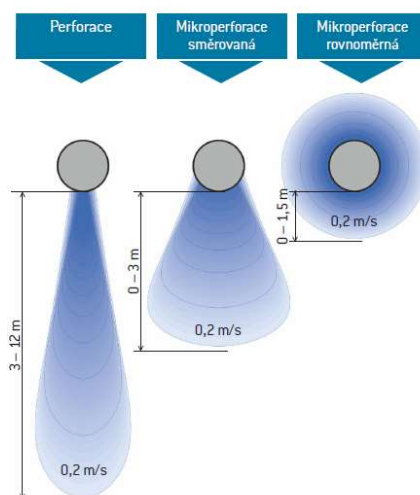
**Obrázek 10** Schema způsobu distribuce velkoobjemové vyústky - zaplavování

Dalším zástupcem této kategorie jsou textilní vyústky. Ty slouží pro transport i distribuci vzduchu. Vzduch je nejčastěji rovnoměrně uvolňován do prostoru prodyšností tkaniny. Dalšími možnostmi, které v dnešní době textilní vyústky umožňují, je distribuce mikroperforacemi a perforacemi. Tento způsob by se řadil do kategorie se střední výstupní rychlostí. Dále mohou být textilní vyústky vybaveny i tryskami, kdy je princip distribuce je obdobou dýz, které již byly zmíněny. Díky možné variabilitě tvorby perforací textilní vyústky umožňují vzduch distribuovat rovnoměrně případně poměrem perforovaných částí proud vzduchu směřovat.



**Obrázek 11** Ukázka distribučního elementu textilní vyústka





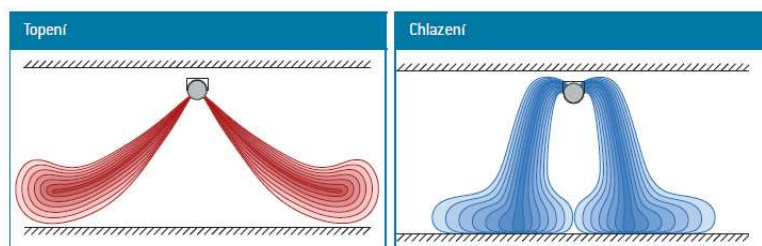
**Obrázek 12** Ukázka způsobu distribuce vzduchu u textilních vyústí



**Obrázek 13** Ukázka kouřové zkoušky pro různé způsoby distribuce vzduchu u textilní vyústí



**Obrázek 14** Detail kouřové zkoušky textilní vyústí



**Obrázek 15** Ukázka obrazu proudění z textilní vyústky pro režim topení / chlazení

## 1.2.2 Gravitační a vztlkové síly

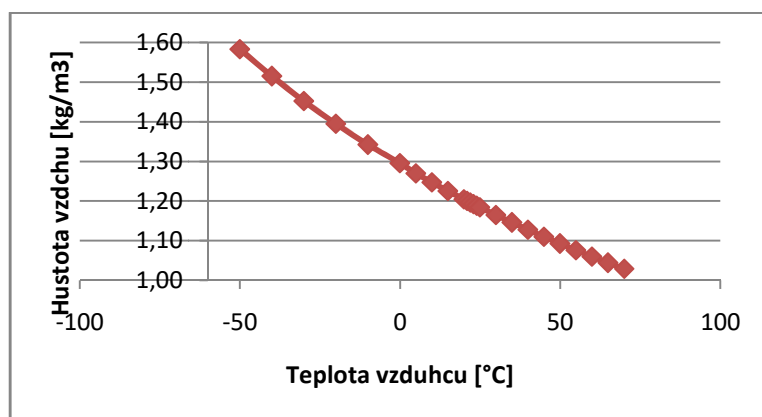
Dle teploty přiváděného vzduchu ve vztahu k teplotě vzduchu v místnosti rozeznáváme dva druhy proudění formující tvar osy proudu:

### *Izotermní*

Izotermní proudění je definováno jako proudění vzduchu z vyústky do prostoru, kdy teplota přiváděného vzduchu je shodná s teplotou vzduchu v místnosti. Díky tomuto předpokladu je vztlková síla působící na proud vzduchu nulová. Z rovnice hybnosti proudění vzduchu nám tedy tato síla vypadá a získáváme jednodušší variantu pro řešení proudu vzduchu.

### *Neizotermní*

Jedná se o proudění přiváděného vzduchu s rozdílnou teplotou oproti teplotě v řešené místnosti. Díky skutečnosti, že vzduch mění svoji hustotu v závislosti na jeho teplotě, je neizotermní proud ovlivněn vztlkovou silou, způsobenu rozdílem hustot vzduchu.



**Graf 1** Závislost hustoty vzduchu na teplotě

Pokud přivádíme vzduch o vyšší teplotě než je v interiéru, proud vzduchu nám stoupá vzhůru. V opačném případě chladný vzduch vlivem gravitační síly klesá dolů. Tímto faktem se musíme řídit při návrhu distribuce vzduchu a volbě distribučních elementů. Při teplovzdušném vytápění volíme vyústky s vyšším dosa-

hem proudu tak, aby dosáhl k pobytové zóně. Proud vzduchu bude brzděn vztlakovou silou.

Naopak pro přivádění vzduchu s nižší teplotou než je v interiéru (letní chlazení) je vhodné volit distribuční elementy s radiálním výstupem proudu vzduchu. Chladný vzduch tak přilne k stropu místnosti a rozprostře se do větší půdorysné vzdálenosti od vyústky a následně vlivem vztlakové síly klesá do pobytové zóny. Přívod chladného vzduchu kruhovým či plochým proudem vzduchu ze stropu svisle dolů není vhodný z důvodu urychlení proudu chladného vzduchu. Ten by posléze významně ovlivnil vnitřní prostředí. Osoby by pociťovaly průvan.

### 1.2.3 Geometrie místnosti

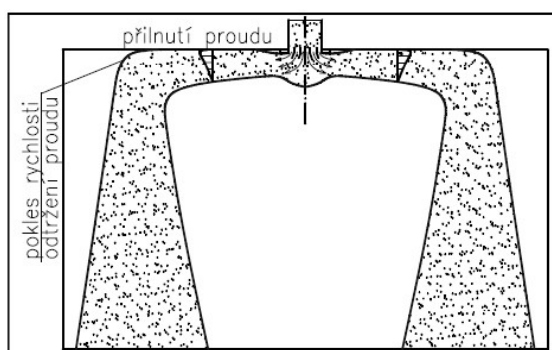
Dle prostoru ve kterém se proud vyskytuje, rozlišujeme tři druhy proudů.

#### ***Volný proud***

Volný proud vzduchu je takový, který není ovlivněn okolními konstrukcemi. Pro tento druh proudu se nejčastěji odvozují analytická řešení proudění.

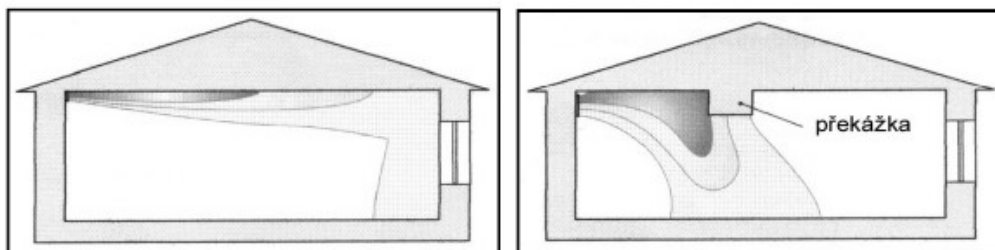
#### ***Poloohraničený proud***

Poloohraničeným proudem nazýváme takový proud, který po výstupu z vyústky je ovlivněn konstrukcí rovnoběžnou s osou proudu. Konstrukce musí být dostatečně blízko osy proudu vzduchu. Díky jevu popsáném jako Coandův efekt dochází k přilnutí proudu vzduchu k ohraničující konstrukci. Pro vznik přilnutí proudu vzduchu ke stropní konstrukci nesmí být vyústka umístěna ve větší vzdálenosti než je 0,2m a musí se jednat o hladký strop. Případně pokud je vyústka těsně u stropu a úhel, který svírá osa proudu s rovinou ohraničující konstrukce je menší než  $40^\circ$ .



**Obrázek 16** Schema proudění s radiálním výstupem vzduchu s vlivem Coandova jevu přilnutí proudu vzduchu

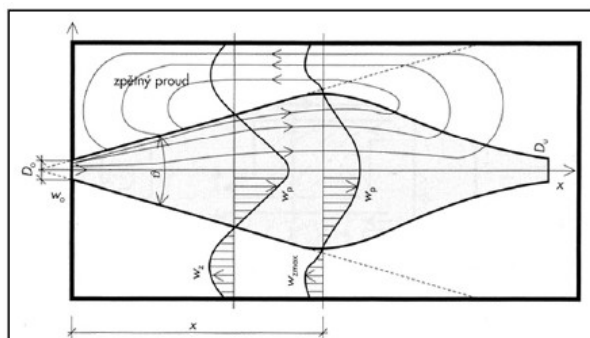
Poloohraničený proud se vyznačuje prodloužením dosahu proudu vzduchu. Prodloužení dosahu proudu vzduchu může být až o  $1/3$ , jak je vidět u obrázku 17 vlevo. Proud přilnutý ke stropní konstrukci má tak velký dosah. Dosah proudu a výsledný obraz proudění však může ovlivnit i vybavení místnosti, které může způsobit změnu směru proudu. Tento jev je znázorněn na obrázku 17 vpravo.



**Obrázek 17** Schéma vlivu geometrie místnosti na proudění vzduchu

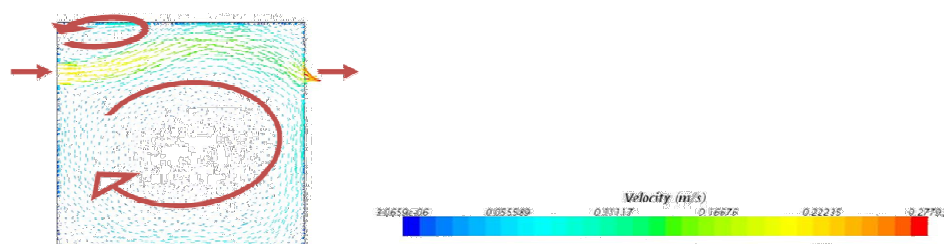
### Ohraničený proud

Jedná se o případ proudění vzduchu v uzavřeném prostoru se vzduchotechnikou. Při řešení ohraničeného proudu již nelze zanedbat vliv zpětných proudů, které jsou dány geometrií místnosti. Je nutné řešit vzájemné působení proudů, kterých může být v místnosti více. Případně se jedná o zpětné proudy vzniklé primárními proudy.



**Obrázek 18** Schéma obrazu proudění pro ohraničený proud s vlivem zpětných proudů

Proudění vzduchu s ohraničenými proudy je velice složité a analytické či empirické řešení lze provádět jen pro zjednodušené případy. Pro stanovení obrazů proudění obecných případů je nejvhodnějším řešením CFD modelování. Příklad zobrazení proudění CFD modelem je patrný na obrázku 19, na kterém je vidět vektorové pole s vyobrazenými rychlostmi. V levé části je přírodní výústka a v pravé části ve stejné výšce je odvod vzduchu z místnosti. Na obrázku je patrný vliv zpětného proudu v levé horní části, který směřuje proud vzduchu ke stropu.



**Obrázek 19** Ukázka výstupu CFD modelu pro místnosti s vyústkami u stropu - patrný vliv zpětných proudů

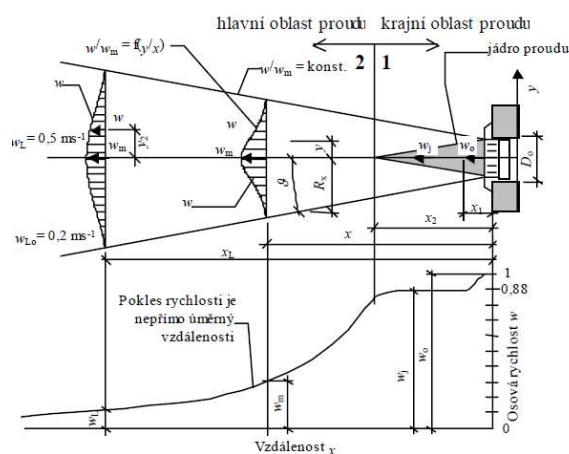
#### 1.2.4 Pohyb lidí a předmětů

Pohyb lidí a strojních součástí má jen velmi malý vliv na změnu obrazů proudění. Tento vliv je podřadný a pro výpočet jej můžeme zanedbat. Může se stát, že v ojedinělých případech, budou lidé v místnosti největším zdrojem tepla a ohřátý vzduch bude vyvolávat stoupavé proudy, které mohou ovlivnit proudění vzduchu v místnosti. Případně strojní vybavení místnosti může rychle pohybujícími se součástmi vyvolávat proudy vzduchu, které ovlivní celkový obraz proudění. Ve většině řešených případu tento jev nenastává. Stále platí, že ke každému systému VZT je nutné přistupovat specificky pro dané podmínky.

### 1.3 Možnosti řešení proudění vzduchu

### 1.3.1 Analytické

Analytickou metodou popisujeme chování fyzikálních zákonů proudění vzduchu. Jelikož je popis parametrů okamžitých rychlostí, průtoků, teplot a hmotnostních koncentrací složitá úloha vycházející z třírozměrného řešení se závislostí na čase, transformujeme analytické řešení do jednorozměrných či dvourozměrných řešení. Nejzákladnějším příkladem analytického řešení je popis volného izotermního proudu vytékajícího z kruhového otvoru.



**Obrázek 20** Schéma oblastí volného izotermního proudu včetně znázornění poklesu rychlosti

Kruhový otvor je zde z důvodu usnadnění popisu proudu. Jedná se o jednu ze základních okrajových podmínek, kdy obecně velké množství kombinací výšky a šířky obdélníkové vyústky převedeme na rovnocenný hydraulický průměr kruhového potrubí. Získáme tím menší množinu vstupních údajů.

Analytické rovnice nám popisují na základě okrajových podmínek vlastnosti proudu vzduchu. Těmi může být rychlostní profil a poloměr proudu v libovolné vzdálenosti od vyústky. Dále osová rychlost, dosah proudu či šířku proudu.

Analytické metody umožňují i popis neizotermního proudu. Dle níže uvedených vzorců lze stanovit výsledný obraz proudění vzduchu pro zadané vstupní hodnoty. Jedná se o výpočet převzatý z cvičení předmětu CT002 Vybrané statě ze vzduchotechniky - VUT FAST BRNO - Ústav technického zařízení budov, cvičení 11 – Obrazy proudění - analytické metody.

Vstupní zadání:

- Teplota interiéru: 19°C
- Výškové umístění vyústky: 3,8m
- Rozměr vyústky: 0,45x0,5m
- Součinitel vířivosti: 0,2
- Rychlost vzduchu u vyústky 1,5m/s
- Teplota vzduchu u vyústky: 21°C
- Úhel proudu vzduchu: 3°

Použité analytické vztahy:

Rovnocenný průměr: 
$$d_0 = 1,13 \cdot \sqrt{a \cdot b} \quad (1.2.1.1)$$

Archimédovo číslo: 
$$Ar = \frac{g \cdot d_0}{v_p^2} \cdot \frac{T_p - T_i}{T_i} \quad (1.2.1.2)$$

Rychlost ve směru x: 
$$v_x = \frac{0,48 \cdot v_p}{a \cdot \frac{x'}{\cos \alpha} + 0,145}; \quad v_{x,max} = v_p \quad (1.2.1.3)$$

Rychlost ve směru y: 
$$v_y = 0,73 \cdot v_p \cdot Ar \cdot \frac{x'}{\cos \alpha} \quad (1.2.1.4)$$

Rychlost v ose proudu: 
$$v_o = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}; \quad v_{o,max} = v_p \quad (1.2.1.5)$$

Výpočet teploty v ose proudu: 
$$t_o = \frac{0,35 \cdot (t_p - t_i)}{a \cdot \frac{x'}{\cos \alpha} + 0,145} + t_i; \quad t_{o,max} = t_p \quad (1.2.1.6)$$

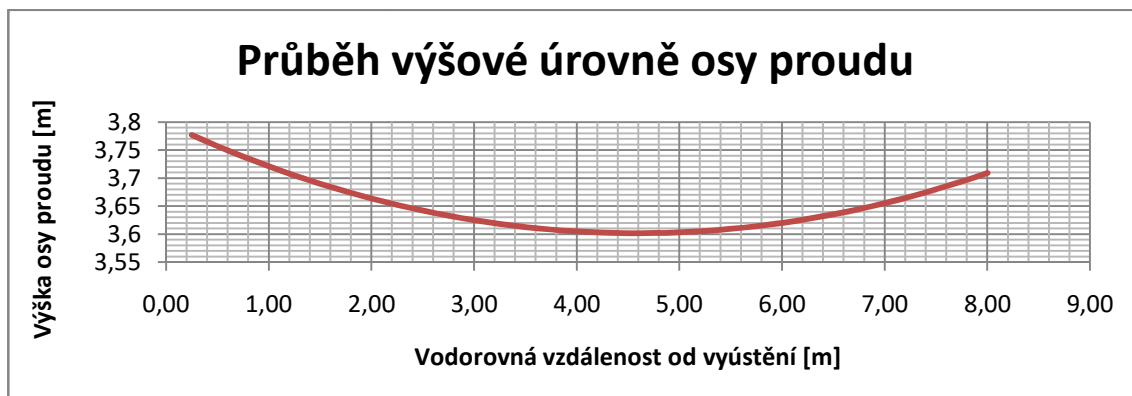
Rovnice osy proudu: 
$$x' = \frac{x}{d_0}$$

$$y' = x' \cdot \operatorname{tg} \alpha + Ar \cdot \left( \frac{x'}{\cos(-\alpha)} \right)^2 \cdot \left( 0,51 \cdot a \cdot \left( \frac{x'}{\cos(-\alpha)} \right) + 0,35 \right)$$

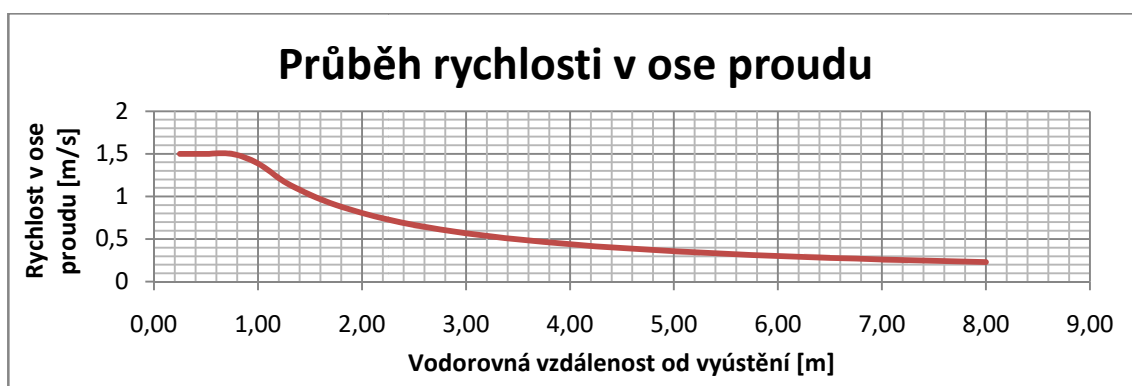
$$y = h + y' \quad (1.2.1.7)$$



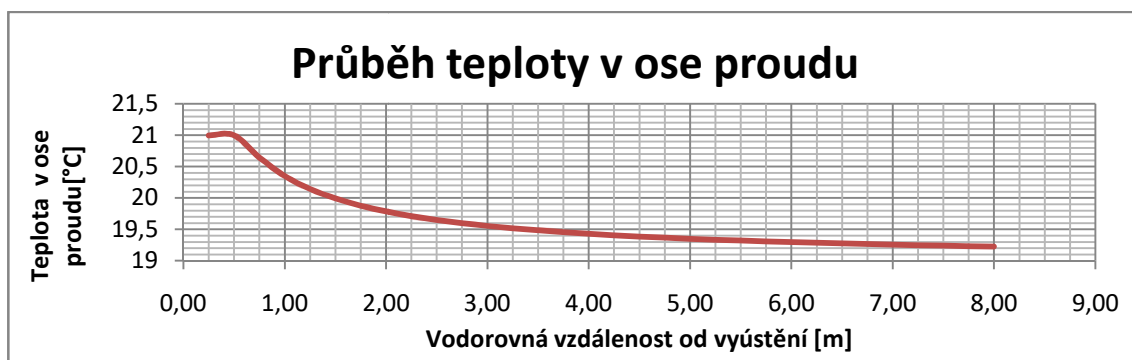
Z výstupu analytického zpracování okrajových podmínek lze určit výškový průběh osy proudu, průběh rychlosti proudu, a teploty proudu.



**Graf 2** Popis výškové úrovně osy proudu pro neizotermní proudění



**Graf 3** Popis průběhu rychlosti proudu pro neizotermní proudění



**Graf 4** Popis průběhu teploty v ose proudu pro neizotermní proudění

Z výsledků zpracování vstupních údajů je patrné, že přiváděný vzduch o vyšší teplotě než je teplota vzduchu v místnosti má tendenci stoupat. Vyústka má lamely nastavené s velmi malým odklonem od vodorovného směru o 3° dolů, aby byl na grafu patrný vliv vztahové síly pro vzduch s teplotami v reálných mezích. Další graf znázorňuje pokles rychlosti v ose proudu. Poslední graf znázorňuje vyrovnávání teploty proudu vzduchu s teplotou vzduchu v interiéru.

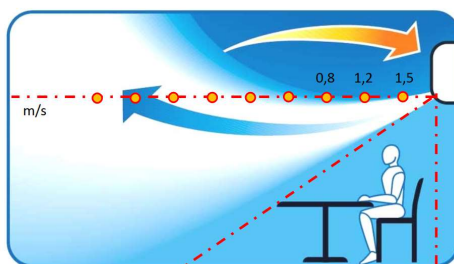


### 1.3.2 Experimentální

Jedná se o užití různých experimentálních měření pro stanovení obrazů proudění vzduchu v konkrétní místnosti. Výhodou je, že díky reálnému prostředí nám experiment zahrnuje velké množství právě nastalých okrajových podmínek. Nevýhodou tohoto měření je fakt, že se jedná o měření až realizovaného stavu. Experimentální měření je vhodné spíše pro ověření správnosti návrhu nebo jako nástroj pro znalecký posudek k prokázání chybného návrhu a následné reklamace projektu.

Druhou možností je experimentální stanovení proudění vzduchu na zmenšeném modelu. Poznatky z měření je možné posléze aplikovat přepočtem na reálný stav.

K vizualizaci proudění vzduchu při experimentálním měření lze využít takzvaných kouřových zkoušek. Jedná se o smísení přiváděného vzduchu s vhodným aerosolem. Díky viditelnosti aerosolu je možné pozorovat vystupující proud vzduchu z vyústky a tak pozorovat vývoj vírů, pokles rychlosti proudu, dosah proudu a tvar proudu.



**Obrázek 21** Schéma způsobu měření rychlostí vzduchu pro popis proudu

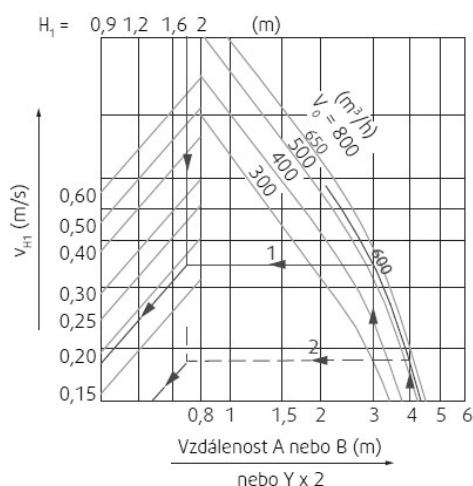


**Obrázek 22** Ukázka kouřové zkoušky pro obdélníkovou vyústku určenou do podlahy

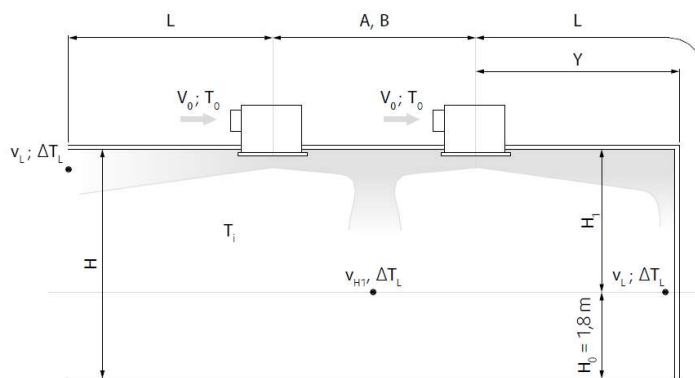
### 1.3.3 Empirické

Empirické stanovení proudění vzduchu vychází z experimentálního měření již zrealizovaných projektů a znalosti analytického přístupu k proudění. K posouzení vhodnosti návrhu dochází porovnáním se skutečným prouděním. Tak můžeme stanovit jisté podobnostní faktory, které nám umožní v budoucnu rychle navrhnout řešení. Díky možnosti čerpat znalosti o proudění z již realizovaných projektů se lze inspirovat z úspěchů a poučit z chyb návrhu. Následně můžeme predikovat chování v nově navrhovaném projektu a přizpůsobit umístění distribučních elementů.

Rychlost proudu vzduchu v zóně pobytu



**Obrázek 23** Příklad empirického stanovení rychlosti proudu vzduchu v zóně pobytu zjednodušeným výpočtem



**Obrázek 24** Schéma pro empirické stanovení rozmístění a druhu distribučních elementů

### 1.3.4 CFD

Posledním zde zmíněným přístupem ke stanovení obrazů proudění je numerické modelování. Jedná se o tzv. CFD modely sloužící k simulaci proudění vzduchu pomocí výpočetní techniky s vysokým výpočetním výkonem. (CFD je označení z anglického názvu Computational Fluid Dynamics, což v překladu znamená výpočetní dynamika tekutin) Jedná se metodu využívající základní fyzikální rovnice jimiž jsou: Zákon zachování hmoty, Zákon zachování hybnosti, Zákon zachování energie a rovnice turbulence vzduchu vlivem setrvačných a třecích sil (k-epsilon model turbulence).

**Numerické modelování se skládá ze tří základních kroků, kterými jsou:**

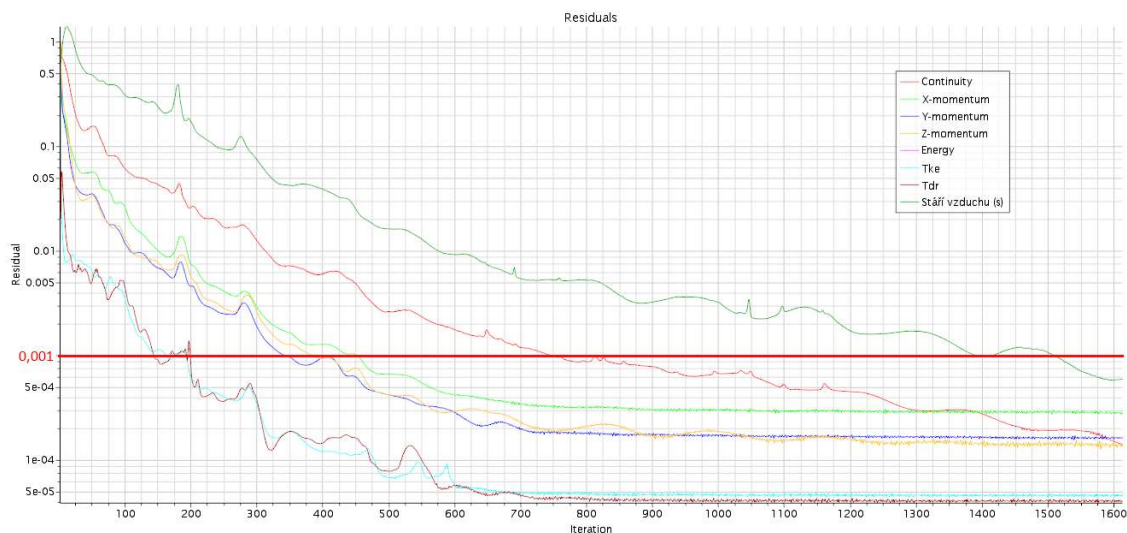
- **Pre-procesing** (analýza vstupních dat)

Tento krok v sobě skrývá analýzu řešeného problému, kdy si musíme stanovit cíle výpočtu. Dále si musíme stanovit, které výstupní údaje pro nás budou stěžejní a co je nejvíce ovlivňuje, jakou přesnost výstupů očekáváme a v jakém prostoru budeme problém řešit. Určujeme také zda se jedná o obecné trojrozměrné řešení nebo zda lze problematiku zjednodušit do dvourozměrného souřadného systému případně do rotačně symetrického. Dalším krokem fáze preprocesing je analýza zadání. V tomto kroku tvoříme základní geometrii modelu a stanovujeme okrajové podmínky. Tento krok je velmi důležitý, protože musíme určit, jaká přesnost geometrie je nutná pro dostatečně vypovídající model a které faktory a jim odpovídající okrajové podmínky budeme ve výpočtech zohledňovat. Vzniklý model je užitím výpočetní techniky rozdělen do základních výpočetních elementů. Tyto výpočetní elementy tvoří základní výpočetní jednotky a jejich vlastnosti udávají konečnou přesnost a výpočetní náročnost. Tvar elementů je jednou ze základních vlastností, kterými výpočetní element disponuje. Mezi základní tvary elementů patří polyhedral, tetraedr a kvádr. Druhým základním parametrem výpočetního elementu je velikost, která udává výsledný počet elementů. Dalším parametrem pro modelování je počet a tloušťka prismatické neboli mezní vrstvy. Prismatická vrstva nám poskytuje zpřesnění výpočtu díky zhuštění výpočetních elementů na okrajích geometrie. Právě v okrajových částech vznikají oblasti s velkým gradientem změn a je zde nutné, aby byl výpočet přesnější.

- **Procesing** (výpočet)

Při výpočtu na základě okrajových podmínek a parametrů výpočtu probíhá samotné řešení modelu, který může, ale nemusí vést k správnému výsledku. Při

výpočtu sledujeme kritérium správnosti výpočtu takzvané reziduum. Jedná se o zbytek po výpočtu řešených rovnic. Výpočet by měl s postupujícími kroky výpočtu vést k snižování tohoto parametru. Při snížení pod danou mez lze výpočet ukončit. Tato mez bývá stanovena na  $1 \times 10^{-3}$ .



**Obrázek 25** Ukázka průběhu výpočtu CFD modelu - průběh reziduí se zaznačenou mezí pro ukončení výpočtu

- **Postprocesing** (zpracování výstupů)

Jedná se o poslední fázi, kterou je zpracování výsledků. Výsledná data je nutné zpracovat a ověřit jejich správnost. Možnými výstupy mohou být skalární či vektorová pole znázorňující požadované veličiny modelu. Tato pole zajišťují přehledné znázornění průběhů zkoumaných veličin v ploše či prostoru. K plošnému znázornění slouží možnost tvorby řezů modelu a na těchto řezových rovinách vykreslit skalární či vektorová pole. Druhou možností je tvorba reportů neboli textových zpráv výsledků. Tyto zprávy slouží k stanovení číselných hodnot výsledků. Lze tak stanovit maximální, minimální či průměrné hodnoty daných veličin. Případně lze stanovit objem zkoumané oblasti a další výstupy. Toto vše lze provádět na různých částech modelu. Díky možnosti vytvoření dílčích objemů na základě zadaných mezí dané veličiny můžeme vyhledávat zprávy o hodnotách výsledků pro dílčí části objemu. Takto lze kombinovat různé způsoby pro stanovení výstupů z vypočteného modelu.

Nutnou částí zpracování výstupů je zamyšlení se nad správností výstupů. CFD model slouží spíše k přesnému vyčíslení průběhů zkoumaných veličin u definovaného případu. Součástí tvorby modelu a zpracování výsledku by mělo být zamyšlení a empirické stanovení přípustných mezí výpočtu. Hrubým vyčíslením lze určit, jaké hodnoty by se mohly v modelu vyskytovat a v kterých místech čekáme

jaké jevy proudění vzduchu. Toto nejčastěji stanovujeme na základě zkušenosti či experimentálně stanovených podkladů od výrobce. Po stanovení výsledku CFD modelu by měla být provedena takzvaná validace, která zajišťuje porovnání zjištěných hodnot s hodnotami stanovenými jiným způsobem. Může se jednat o experimentální měření či empirické porovnání s poznatky z jiných VZT systémů.

## 1.4 Závěr

Proudění vzduchu a metody určení parametrů vzduchu v uzavřeném prostoru jsou důležité pro stanovení kvality prostředí. Pokud se bude jednat o Pracovní prostředí je nutné dodržet Nařízení vlády č. 361/2007 Sb, kterým se stanovují podmínky ochrany zdraví při práci. V nařízení jsou pro jednotlivé třídy práce určeny limitní hodnoty pro parametry vzduchu vnitřního prostředí. Tyto parametry určuje tabulka č. 2 dle Nařízení vlády č. 361/2007 Sb, kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci ve znění pozdější předpisů.[1]

Tabulka 2

Třída práce	M[W.m <sup>-2</sup> ] (brutto)	t <sub>omin</sub> nebo t <sub>gmin</sub> [°C]	t <sub>omax</sub> nebo t <sub>gmax</sub> [°C]	V <sub>a</sub> [m.s <sup>-1</sup> ]	Rh[%]
I	≤ 80	20	27	0,01 až 0,2	
IIa	81 až 105	18	26		
IIb <sup>3)</sup>	106 až 130	14	32	0,05 až 0,3	
IIIa	131 až 160	10	30	0,1 až 0,5	30 až 70
IIIb	161 až 200	10	26		
IVa	201 až 250	10	24		
IVb <sup>1)</sup>	251 až 300	10	20		
V <sup>2)</sup>	301 a více	10	20		

Vysvětlivka k tabulce č. 2:

- Hodnoty  $t_{omax}$  nebo  $t_{gmax}$  pro přirozeně větraná pracoviště vyžadují oblek o tepelném odporu 0,5 clo.
- Hodnoty  $t_{omin}$  nebo  $t_{gmin}$  pro přirozeně větraná pracoviště vyžadují oblek o tepelném odporu 1,0 clo.
- V případě, že  $v_a$  na pracovišti je  $\leq 0,2 \text{ m.s}^{-1}$  platí, že  $t_o = t_g$
- Práce třídy IV<sub>b</sub> není pro ženy celosměnově přípustná z hlediska hygienických limitů fyzické zátěže, režimová opatření je nutno aplikovat i při  $t_o \leq 10 \text{ °C}$ .
- Práce třídy V není pro ženy z hlediska hygienických limitů fyzické zátěže přípustná; pro muže není celosměnově z hlediska hygienických limitů fyzické zátěže přípustná, režimová opatření je nutno aplikovat i při  $t_o \leq 10 \text{ °C}$ .
- U prací zařazených do třídy práce II<sub>b</sub> až V musí být současně dodrženy přípustné limity pro krátkodobě a dlouhodobě přípustnou zátěž z hlediska energetické náročnosti práce.



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ BUDOV**

INSTITUTE OF BUILDING SERVICES

**PRAKTICKÁ ČÁST**

## ÚVOD

Praktická část diplomové práce se zabývá posouzením proudění v prostoru depozitáře. Jedná se o shodný projekt řešený v bakalářské práci Mikroklima a vzduchotechnika prostorů depozitáře. V této části je řešeno posouzení vhodnosti předešlého návrhu a srovnání s další variantou distribuce vzduchu v prostoru depozitáře. [3]

### 2.1 Analýza projektu

Řešená místnost se nachází v prvním podzemním podlaží budovy v centru Brna. Jedná se o prostor depozitáře se smíšenou sbírkou. Prostor depozitáře je obsluhován podstropní VZT jednotkou, která je umístěna v podzemní garáži v 1. PP. Jednotka je cirkulační s 15% podílem čerstvého vzduchu. VZT jednotka zajišťuje v letním období chlazení přiváděného vzduchu a řízené odvlhčení vzduchu. V zimním období je uvažováno s cirkulací oběhového vzduchu a tudíž se zpětným tokem vnitřní vlhkosti do prostoru, v zimním období je uvažováno s řízeným vlhčením. Je uvažováno s hygienickým minimem čerstvého vzduchu pro 5 pracovníků. S ohledem na nízké provozní náklady je realizována 85% cirkulace oběhového vzduchu. Při vhodných venkovních podmínkách je navržena možnost provozu bez cirkulace, kdy je přírodní vzduch z exteriéru přímo transportován do interiéru. Z tohoto důvodu je trasa sání čerstvého vzduchu z exteriéru dimenzována na plný průtok  $2000\text{m}^3/\text{h}$ . Za běžných venkovních podmínek bude systém pracovat s 15% podílem čerstvého vzduchu.

Přívodní i odvodní koncové elementy jsou umístěny přímo na potrubí. Přívodní koncové elementy jsou s dvouřadou stavitelnou regulací směru proudění vzduchu. Odvodní koncové elementy mají pouze jednořadou regulaci.

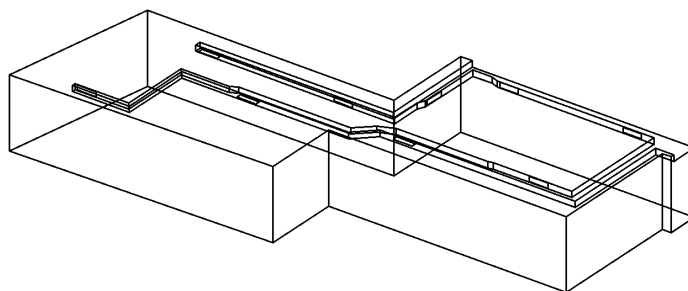
Všechny přívodní a odvodní koncové elementy jsou vybaveny těsnou regulační klapkou na nástavci na VZT potrubí a koncovém elementu

Sání čerstvého vzduchu je řešeno v prostorech podzemních garáží v 1. PP a to protidešťovou žaluzií na fasádě do dvorku. [3]

## 2.2 Hodnocení distribuce VZT systému

### 2.2.1 Sestavení modelu pro CFD

Pro popis proudění v zadané budově byl sestaven CFD 3D model řešené místnosti. Pro tvorbu geometrické sítě byla použita 3D nadstavba programu AutoCAD. Vzhledem ke stupni geometrického zjednodušení řešené místnosti byl tento programový nástroj pro tvorbu 3D geometrické sítě dostatečný.



**Obrázek 26** Síťový model místnosti depozitáře

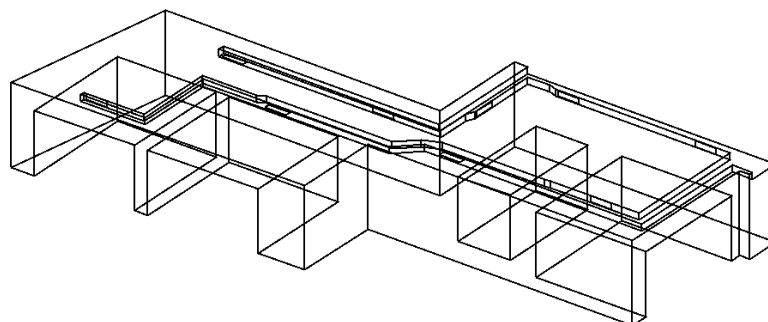
V prostoru depozitáře se nachází skladovací regály, které tvoří nezanedbatelný prvek v místnosti. Regály silně ovlivňují proudění v prostoru. Tyto regály jsou tvořeny kovovým pláštěm a jsou pro vzduch téměř nepropustné. Přiložená fotografie, která byla pořízená v depozitáři, ukazuje charakter těchto regálů. obrázek 27



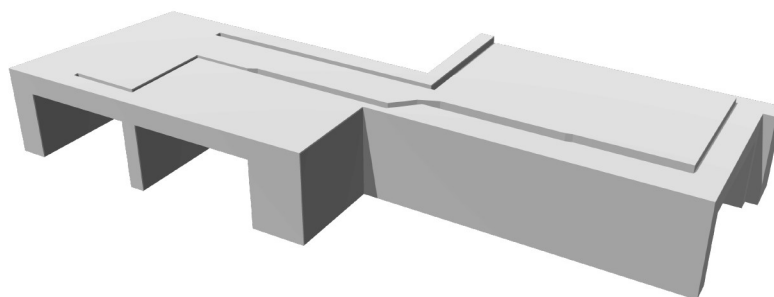
**Obrázek 27** Fotografie přibližující charakter skladovacích regálů



Z výše popsaných důvodů jsem se rozhodl tyto regály vyjmout v celém objemu a řešit proudění v prostoru s odečtením objemu těchto regálů.



**Obrázek 28** Síťový model po odečtu objemu regálu



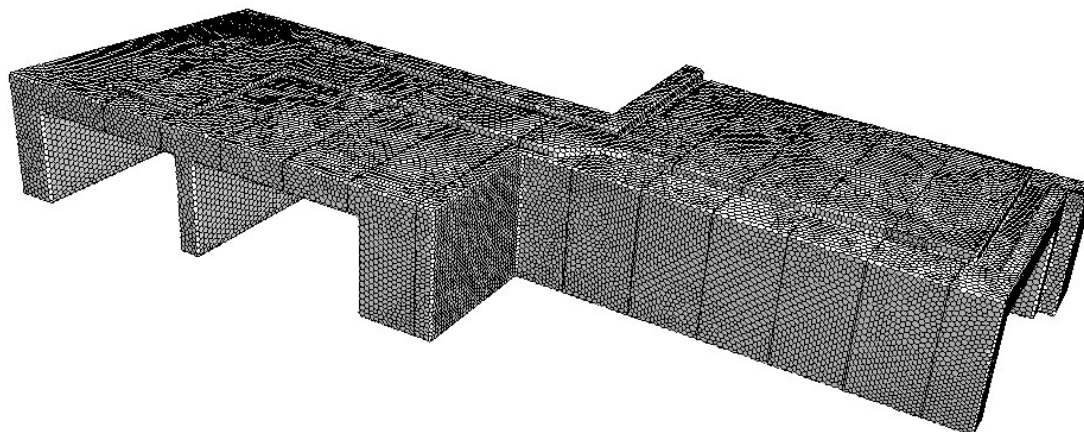
**Obrázek 29** Vzniklý model s přiznanými plochami

Tento 3D model je výchozí pro import do simulačního programu. Model je optimalizován pro omezení kritických míst, která by mohla způsobovat chyby ve výpočtu.

Jedním z míst, které jsem zanedbal, byl prostor mezi odečteným objemem VZT potrubí a stěnou a prostor mezi přívodním a odvodním potrubím. Výsledný objem po odečtu těchto prvků je  $265,6\text{m}^3$ . Původní objem místnosti stanovený z vnitřních rozměrů a výšky stropu je  $411,2\text{m}^3$ . Toto snížení objemu modelu má za následek navýšení výměny vzduchu v řešené části na hodnotu  $7,5\text{h}^{-1}$  oproti původnímu návrhu výměny vzduchu  $5\text{h}^{-1}$ .

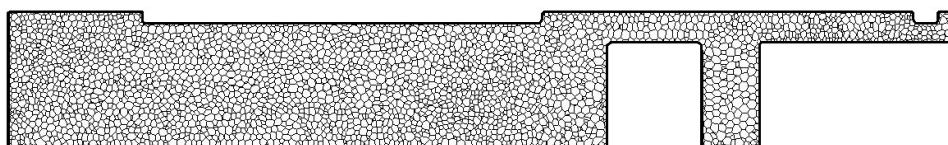
Pro vygenerování výpočtové sítě byl použit vestavěný modul simulačního programu, který načtený model rozdělil na konečný počet objemů. Průměrná velikost tvořeného elementu byla postupným procesem tvorby a sledování stability výpočtu stanovena na hodnotu  $0,08\text{m}$  ( $80\text{ mm}$ ). Při tomto nastavení bylo vygenerováno 212 320 985 elementů.

Níže uvedené obrázky zobrazují model se zobrazením sítě konečného množství dílčích objemů.

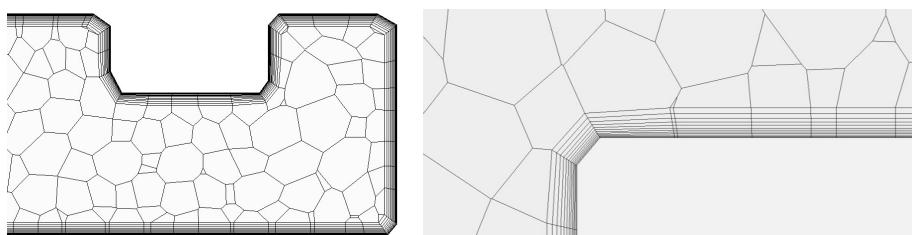


**Obrázek 30** Model s vyznačením výpočetních elementů

Pro ukázkou tvaru a přiblížení počtu dílčích objemů jsou sestrojeny řezy objemem místnosti. V řezech je vidět tvar dílčích objemů a zhuštění výpočetní sítě v těsné blízkosti povrchů pro výpočetní mezní vrstvy.



**Obrázek 31** Řez modelem s vyznačením výpočetních elementů



**Obrázek 32** Detail řezu modelem - patrné zavedení mezní vrstvy

### ***Nastavení okrajových podmínek modelu***

Celý povrch modelu je nastaven jako okrajová podmínka – stěna. Tato okrajová podmínka neumožňuje proudění vzduchu přes rovinu stěny a rychlost stěny je rovna nule. Z toho vyplývá podmínka, že rychlost proudícího vzduchu přibližujeme-li se limitně k povrchu je nulová.

Jediná místa na povrchu, která mají jinou okrajovou podmínku, jsou vstupy a výstupy vzduchu.

Pro přívod vzduchu do modelu jsou vytvořeny v ploše modelu obdelníkové plochy, kterým je přiřazena podmínka hmotnostního průtoku. Pro řešení přívodu vzduchu byly dvě možnosti okrajových podmínek. Jednalo se o rychlostní podmínky, kdy je ploše přiřazena rychlost proudění vzduchu. Objemový průtok vzduchu, který je typický pro definici přívodního elementu, se poté stanoví dle vzorce (2.2.1).

$$Q = v \times S \times 3600 \text{ [m}^3/\text{h]} \quad (2.2.1)$$

A opačně ze známého objemového průtoku vzduchu lze dopočítat rychlost nutnou k nastavení rychlostní okrajové podmínky.

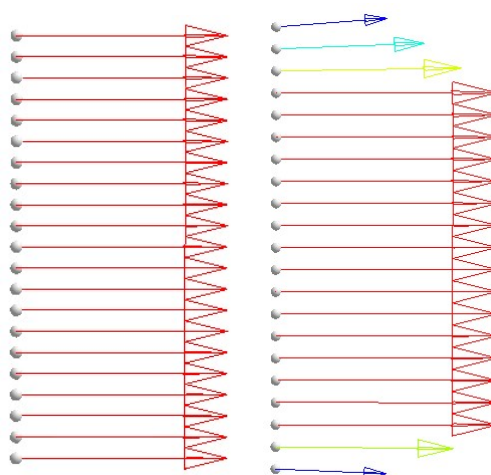
$$v = \frac{Q}{S \times 3600} \text{ [m/s]} \quad (2.2.2)$$

$v$  – rychlost nastavená pro okrajovou podmínku

$S$  – plocha geometrie s rychlostní okrajovou podmínkou

Tato rychlostní okrajová podmínka hůře vystihuje skutečný průběh rozložení rychlostí na distribučním elementu. Při zadání rychlostní okrajové podmínky se vytvoří plocha s jednotnou rychlostí ve všech částech. Toto rozložení je patrné na obrázku 33 vlevo.

Rychlostní okrajová podmínka      Podmínka s hmotnostním průtokem



**Obrázek 33** Ukázka rozložení rychlosti přiváděného vzduchu pro různé okrajové podmínky

Oproti tomu při zadání okrajové podmínky s hmotnostním průtokem je vytvořeno výstižnější rozložení rychlostí přívodního vzduchu. Toto rozložení je znázorněno na obrázku 33 vpravo. Z tohoto důvodu byla pro výpočtový model použita okrajová podmínka hmotnostního průtoku. Ta byla stanovena z projektové hodnoty objemového průtoku 2000m<sup>3</sup>/h. Pro zadání byla tato hodnota rozpočtena na jednotlivé vyústky a u nich bylo množství přiváděného vzduchu převedeno z objemového průtoku na průtok hmotnostní.

$$Q_v = Q_m \times \rho_t [\text{kg/s}] \quad (2.2.2)$$

Pro účel převodu objemového průtoku na hmotnostní průtok byla použita hustota vzduchu při teplotě přiváděného vzduchu ( $t_p=19^\circ\text{C}$ )  $\rho_t = 1,20888 \text{ kg.m}^{-3}$

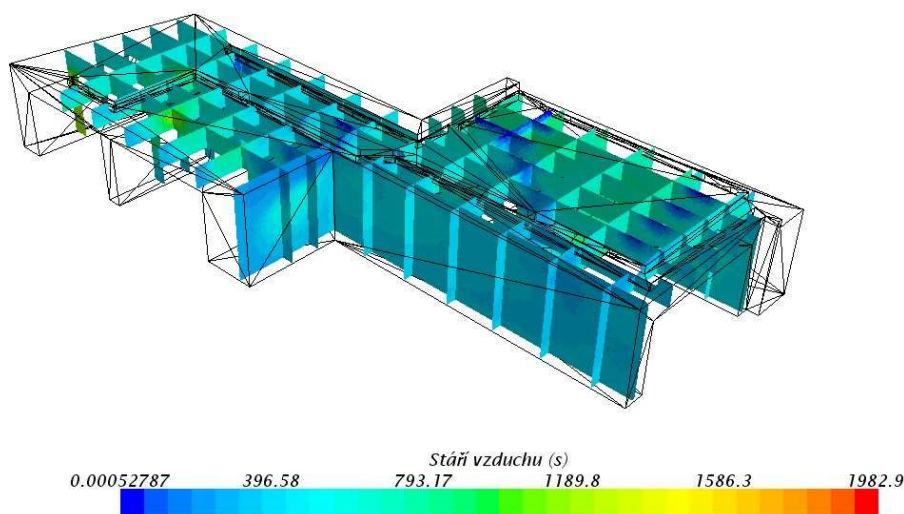
Pro popis proudění byl zvolen k- $\epsilon$  model turbulence a po dohodě s vedoucím práce bylo řešení zjednodušeno na izotermní model. Nebylo tedy nutné řešit měnící se hustotu vzduchu a proto byla zadána funkce konstantní hustoty. Zjednodušení modelu pomocí izotermního proudění je zde možné zavést díky nízkému gradientu mezi přiváděnou teplotou a teplotou v interiéru. Za ideálních skladovacích podmínek je tepelná ztráta a zisk místnosti v průběhu roku natolik nízká a množství přiváděného vzduchu je natolik vysoké, že není nutné podchlazovat či výrazně předehřívat přiváděný vzduch.

## 2.2.2 Zkoumaný parametr vnitřního prostředí

Pro prostor depozitáře je důležité stanovení homogenity prostředí. Pro stanovení homogenity prostředí bylo rozhodující, zda v prostoru se nachází místa se zhoršenou kvalitou prostředí. Místa se sníženou výměnou jsou i místy kde je možné hromadění nežádoucích faktorů vzduchu. V těchto místech může docházet ke zvýšení vzdušné vlhkosti a teplotním výkyvům oproti průměru v místnosti. Dle doporučení Národní knihovny České republiky je teplota pro skladování  $18 \pm 2^\circ\text{C}$  s kolísáním do  $2^\circ\text{C}$  za 24 hodin a relativní vlhkost  $50 \pm 5\%$  s kolísáním do 5% za 24 hodin. Tyto docela přísné hodnoty je nutné zajistit přesnou klimatizací s dobře navrženým systémem měření a regulace. Homogenní prostředí lze dobře zajistit vysokou výměnou vzduchu a vhodným návrhem distribuce vzduchu. Snahou je co nejvíce omezit místa se sníženou výměnou vzduchu, kde dochází k růstu doby stáří vzduchu. Právě tyto oblasti vnitřního prostředí negativně působí na skladované archiválie.

Jedním z výstupů CFD modelu bylo rozložení doby stáří vzduchu v objemu místnosti. Stáří vzduchu nám udává čas v sekundách, který vzduch v místnosti proudí. Pro jednotlivé výpočetní elementy lze tak zjistit, za jak dlouho se vymění objem vzdu-

chu daného elementu. Toto znázornění je ideální pro analýzu zkoumané místnosti a lze tak určit problematická místa a posoudit návrh distribuce vzduchu.



**Obrázek 34** Skalární pole stáří vzduchu vyznačené na ekvidistantních řezech modelem

Na obrázku 34 se sestrojenými ekvidistantními řezovými rovinami ve dvou na sebe kolmých směrech je patrné rozložení stáří vzduchu v místnosti, které je určeno funkcí Stáří vzduchu v sekundách.

Z barevné škály pod modelem je patrné, jakých hodnot stáří vzduchu dosahuje v daných místech prostoru. Dále zde můžeme vyčíst maximální hodnotu stáří vzduchu. (Nejedná se přesně o maximální hodnotu stáří vzduchu, ale o maximální hodnotu nalezenou v řezových rovinách. Díky hustému rozložení řezových rovin je hodnota uvedená na barevné škále jako maximální, blízká maximální hodnotě v celém objemu místnosti.)

Z hodnoty času stáří vzduchu v místnosti lze dopočítat, jakou hodnotu výměny vzduchu dosahujeme v každém z elementů výpočetní sítě. Hodnotu výměny vzduchu dostaneme tak, že podělíme číslo 3600 hodnotou stáří vzduchu v sekundách. Pro zjednodušení zavádíme pro hodnotu Stáří vzduchu zkratku  $t_{sv}$

Hodnota výměny vzduchu je:

$$n = \frac{3600}{t_{sv}} [h^{-1}] \quad (2.2.2)$$

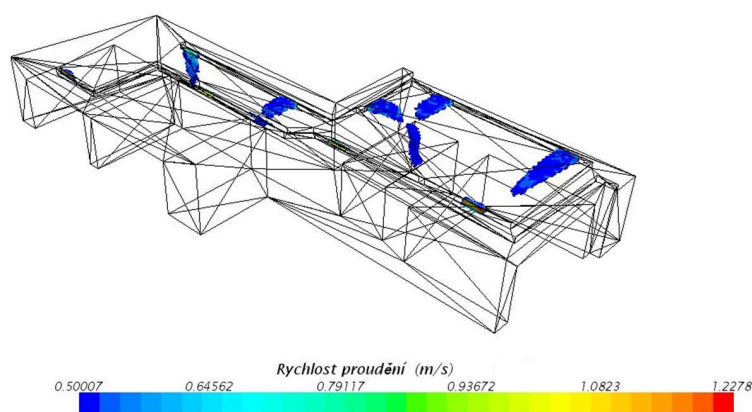
### 2.2.3 Popis první varianty

První varianta je založena na původním návrhu distribuce vzduchu. Jedná se o pět přívodních vyústek osazených přímo na potrubí a čtyři odvodní vyústky rovněž osazené na potrubí. Přívodní i odvodní vyústky jsou rozměru 800/200 mm a potrubí je situováno u stropu místnosti.

### 2.2.4 Výstupy z první varianty

Po výpočtu modelu, kdy výsledek byl již dostatečně upřesněn, je možné dospět k výstupům ze simulačního programu. Jedná se o takzvaný postprocessing, neboli zpracování dat. V modelu lze určit zkoumané rozložení stárí vzduchu v prostoru. Dále lze zjistit rychlost proudění vzduchu v kterémkoli místě objemu depozitáře a tak ověřit zda nedochází k průvanu v pracovní oblasti či překročení doporučených hodnot pro skladování. Konkrétní číselné zhodnocení je uvedeno v celkovém porovnání variant. Z výsledků lze říci, že depozitář je vhodně navržen a výsledný obraz proudění se shoduje s předpokládaným návrhem, kdy bylo rozmístění distribučních elementů provedeno pouze na základě empirického zhodnocení.

Díky modelu byl ověřen i požadavek pro skladování archiválií na maximální rychlost proudění vzduchu v místnosti. Dle doporučených parametrů pro některé druhy fondů pocházející z podkladů Národní knihovny České republiky je maximální rychlost proudění vzduchu 0,5 m/s. Výstupem z CFD modelu po odfiltrování objemu vzduchu s rychlostí větší než 0,5 m/s je patrný rozsah oblasti, kde tento požadavek není splněn.



**Obrázek 35** Model první varianty s vyznačeným objemem vzduchu s rychlostí vyšší než 0,5 m/s

Z výstupu je patrné, že oblast rychlosti přesahující hodnotu 0,5 m/s je pouze u přívodů a sání vzduchu v místnosti. Proudění vzduchu téměř nezasahují do prostoru, kde se skladují archiválie a tak je neohrožují. Požadavek na skladování je tedy splněn a příslušný návrh distribuce vzduchu je správný.



### 2.2.5 Druhá varianta – popis změn

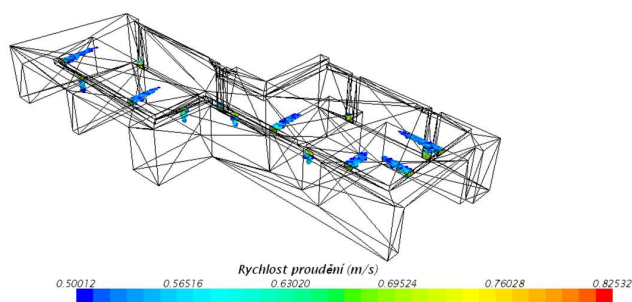
Druhá varianta byla sestavena s odlišnou distribucí. Přívodní potrubí je půdorysně situováno v místě odvodního potrubí z první varianty. Odvodní potrubí naopak půdorysně nahrazuje přívodní potrubí. U odvodního potrubí jsou navíc vytvořeny odvodní kanály, které situují odvodní vyústky k podlaze. Počet přívodních vyústek byl zdvojnásoben z původních 5 distribučních elementů na 10 s poloviční plochou pro přívod vzduchu. Jedná se tedy o 10 přívodních vyústek s rozměrem 400/200mm a 4 odvodní vyústky o rozměru 425/425mm.

Objemový průtok přiváděného vzduchu zůstal nezměněn. Úpravy na druhé variantě by neměly nijak výrazně ovlivnit zbytek VZT systému. U odlišné distribuce může dojít k navýšení tlakové ztráty potrubí, ale celkový vliv na návrh jednotky by měl být pokryt v rámci rezervy při návrhu VZT jednotky.

U této varianty není zcela dbáno na jednoduché provedení VZT systému a nová distribuce je navržena v kolizi se stávajícím zařízením depozitáře. K tomu bylo přistoupeno pro získání co možná nejlepšího návrhu distribuce i za cenu mírných úprav na stávajícím vybavení místnosti depozitáře.

### 2.2.6 Výstupy

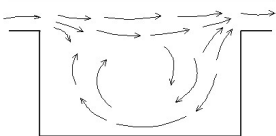
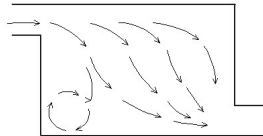
Po dokončení výpočtu druhé varianty byl zvolen stejný systém vyhodnocení dat jako u první varianty. První zkoumaný parametr nové distribuce vzduchu byl maximální hodnota stáří vzduchu. Tato hodnota byla velice překvapivě vyšší než u první varianty. Toto zjištění bylo nečekané a vedlo k myšlence, že nový způsob distribuce je horší, než původní. Jednalo se o navýšení z původní hodnoty 2028s na hodnotu 2178s. Při podrobnějším zkoumání rozložení stáří vzduchu v celém objemu místnosti bylo zjištěno, že se opravdu jedná o zlepšení vnitřního prostředí v místnosti depozitáře. Konkrétní hodnoty zlepšení jsou uvedeny v následující kapitole srovnávající oba navržené systémy distribuce vzduchu.



**Obrázek 36** Model druhé varianty z vyznačeným objemem vzduchu s rychlostí vyšší než 0,5 m/s

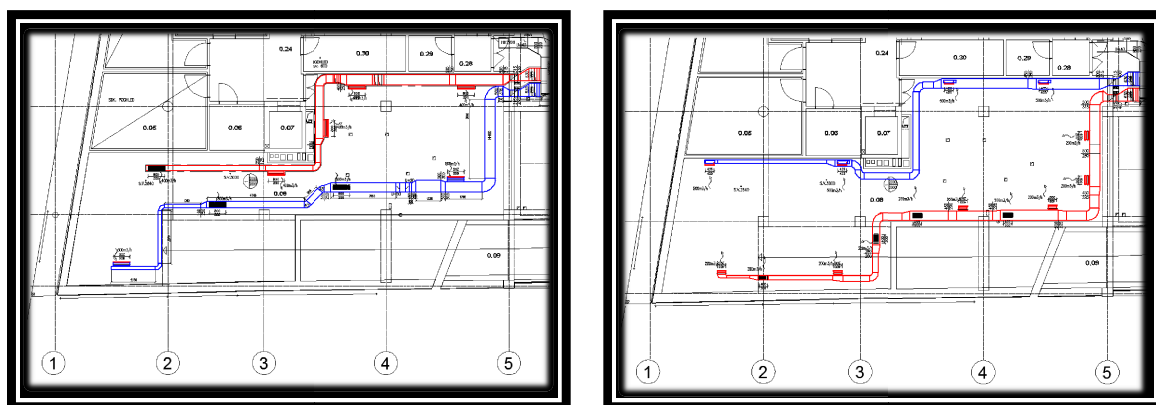
## 2.2.7 Srovnání dvojice variant

**Tabulka 1** Porovnání dvojice variant distribuce vzduchu pro prostor depozitáře

Porovnání dvojice variant distribuce vzduchu pro prostor depozitáře		
	První varianta Původní návrh	Druhá varianta Nové řešení distribuce vzduchu
Teplota přiváděného vzduchu	19°C	19°C
Návrhový průtok vzduchu	2000m <sup>3</sup> /h	2000m <sup>3</sup> /h
Přívodní výústky		
Počet výústek [ks]	5	10
Průtok vzduchu na výústku [m <sup>3</sup> /h]	400	200
Průtok vzduchu na výústku [kg/s]	0,134	0,067
Volná plocha výústky [m <sup>2</sup> ]	0,131	0,062
Umístění elementu	U stropu	U stropu
Odvodní výústky		
Počet výústek [ks]	4	4
Průtok vzduchu na výústku [m <sup>3</sup> /h]	500	500
Průtok vzduchu na výústku [kg/s]	0,168	0,168
Volná plocha výústky [m <sup>2</sup> ]	0,131	0,131
Umístění elementu	U stropu	U podlahy
		
Hodnocení stáří vzduchu		
Maximální stáří vzduchu [s]	2028	2178
Minimální hodnota výměny vzduchu [h <sup>-1</sup> ]	1,78	1,65
Průměrné stáří vzduchu [s]	539	518
Průměrná hodnota výměny vzduchu [h <sup>-1</sup> ]	6,68	6,95

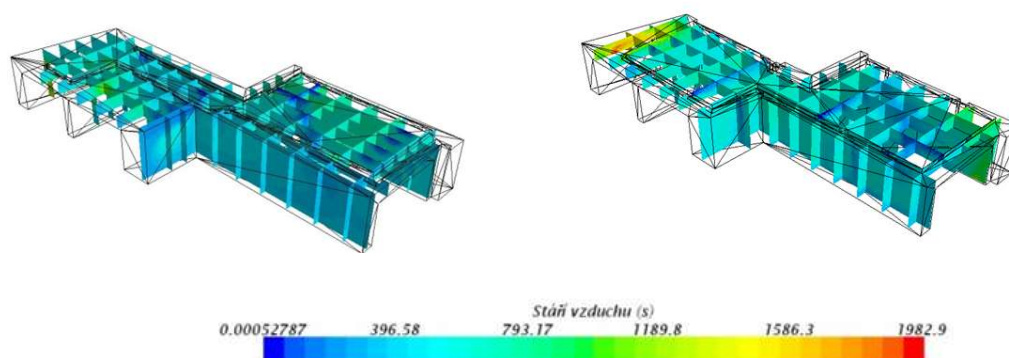


## Druhá varianta – Nové řešení distribuce vzduchu



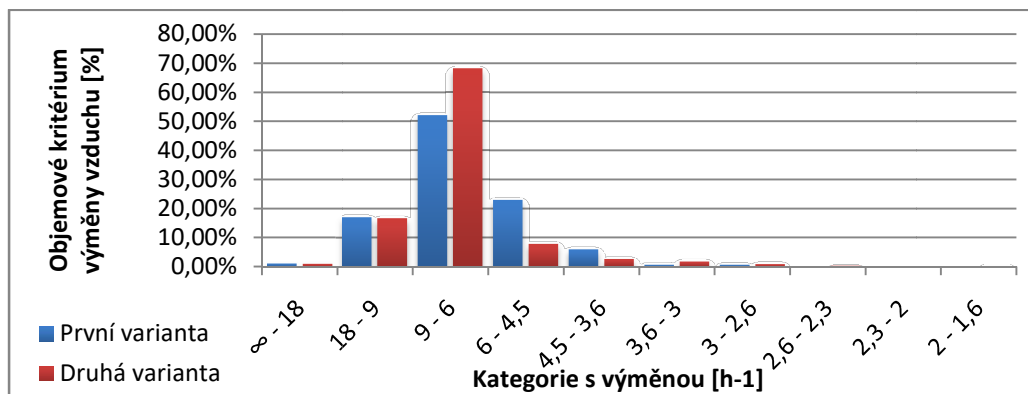
Na obrázku 37 jsou znázorněny výřezy z půdorysů VZT systémů pro řešenou dvojici variant. Červené potrubí na obrázku značí přívodní potrubí VZT systému a odvodní potrubí je znázorněné v barvě modré. Na obrázku 38 lze pozorovat mírnou odlišnost v rozložení stárí vzduchu v prostoru depozitáře zobrazenou na dvojici kolmých ekvidistantní řezů rozložených rovnoměrně v celém objemu řešené místnosti.

## Druhá varianta – Nové řešení distribuce vzduchu



Jak je vidět z obrázku 38, největší zastoupení stáří vzduchu je mezi 200-800 sekundami. Což odpovídá výměně 4-16 h<sup>-1</sup>. Pro účel stanovení rozložení stáří vzduchu v jednotlivých částech místnosti, po dohodě s vedoucím práce zavádíme pojem objemové kritérium výměny vzduchu. Toto objemové kritérium výměny vzduchu udává zastoupení objemu vzduchu s výměnou v daných mezích v porovnání s celkovým objemem vzduchu v místnosti. Takto lze hodnotit, jak velká část objemu místnosti zastupuje kategorii s danou dobou stáří vzduchu.

Rozložení tohoto kritéria ve všech zkoumaných kategoriích výměny vzduchu je náznorně zobrazeno na dalším grafu.



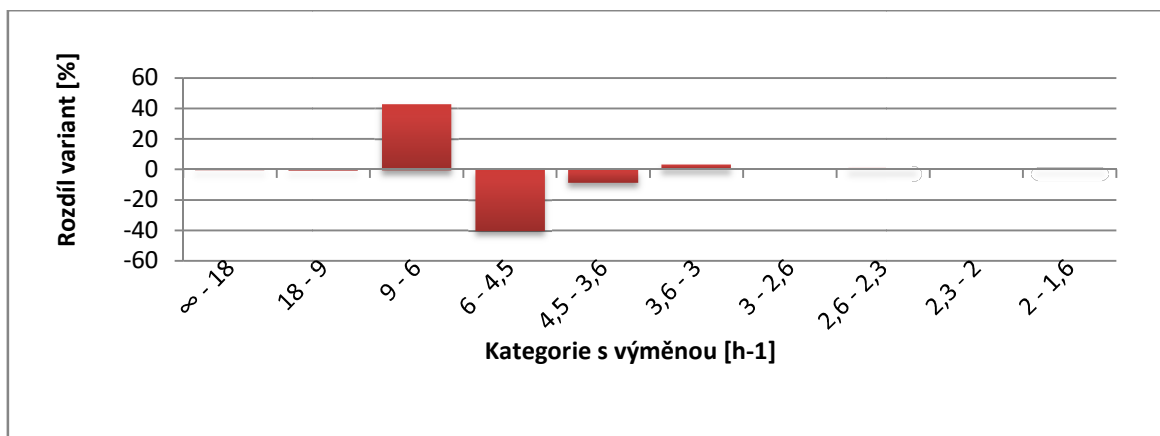
**Graf 5** Objemové kritérium výměny vzduchu jednotlivých kategorií výměn vzduchu

Tento graf určuje hodnoty objemového kritéria výměny vzduchu v patřičné kategorii výměny vzduchu. Tyto kategorie výměn vzduchu byly stanoveny přepočtem dle vztahu 2.2.2. s časovým rokem stáří vzduchu 200s. Poslední kategorie 2-1,6 h<sup>-1</sup> v sobě zahrnuje objem místnosti se stářím vzduchu vyšším než 1800s. Z grafu lze například vyčíst, že u první varianty, která nám popisuje původní stav, je nejvyšší zastoupení objemu při výměně vzduchu 6 až 9 krát za hodinu. Konkrétně se jedná o 52,01% objemu místnosti.

Jako zásadní pozorování je z grafu patrné navýšení objemového kritéria výměny vzduchu u druhé varianty. Konkrétně se jedná o kategorii s výměnou 6-9h<sup>-1</sup>. Zvýšení v tomto rozmezí proběhlo z hodnoty pro stávající stav 52,01% na hodnotu 68,14%. Jedná se tedy o zvětšení objemu vzduchu s danou výměnou o 16,13%. Právě toto navýšení značí zlepšení vnitřního prostředí v místnosti. Níže uvedená tabulka č. 2.1 vyčísľuje objemové kritérium výměny vzduchu v daných kategoriích výměn vzduchu včetně porovnání změn, které nastaly mezi první a druhou variantou.

**Tabulka 2.1** Vyčísľení objemového kritéria výměny vzduchu pro jednotlivé kategorie výměn vzduchu

	První varianta	Druhá varianta	Rozdíl
∞ - 18	1,31%	1,17%	-0,14%
18 - 9	17,00%	16,74%	-0,26%
9 - 6	52,01%	68,14%	16,13%
6 - 4,5	22,94%	7,87%	-15,06%
4,5 - 3,6	5,96%	2,75%	-3,22%
3,6 - 3	0,72%	1,81%	1,10%
3 - 2,6	0,76%	0,89%	0,14%
2,6 - 2,3	0,05%	0,37%	0,32%
2,3 - 2	0,02%	0,15%	0,13%
2 - 1,6	0,01%	0,07%	0,06%



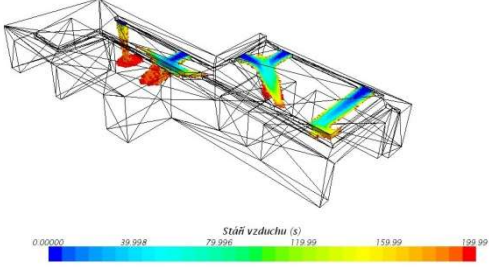
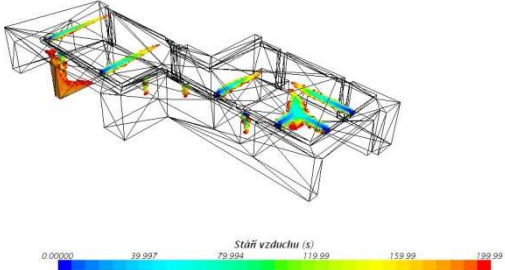
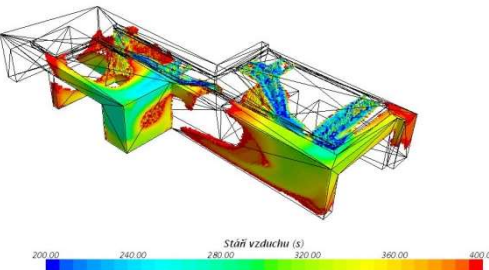
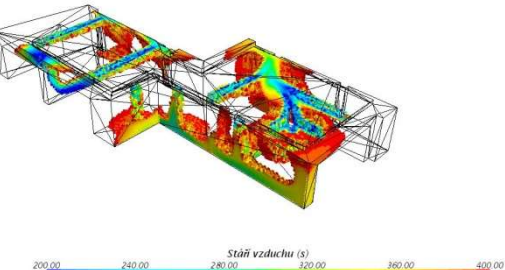
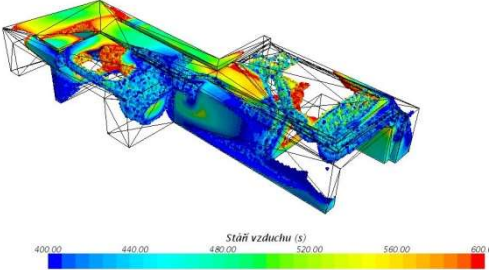
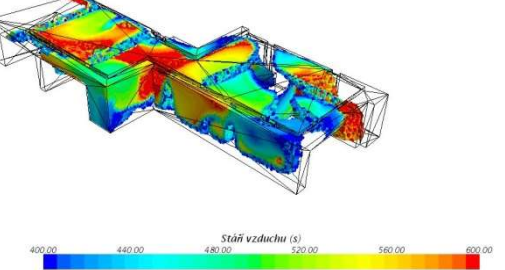
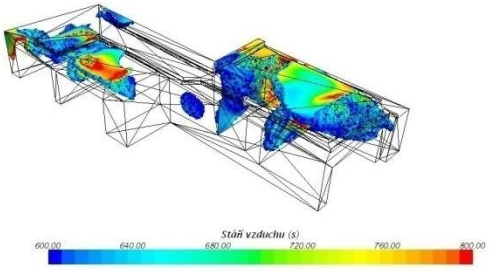
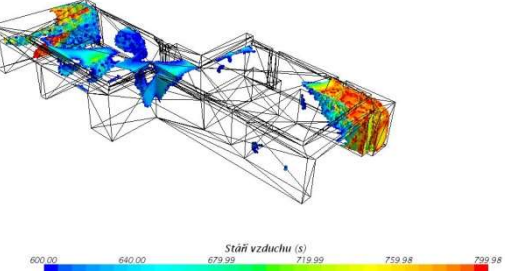
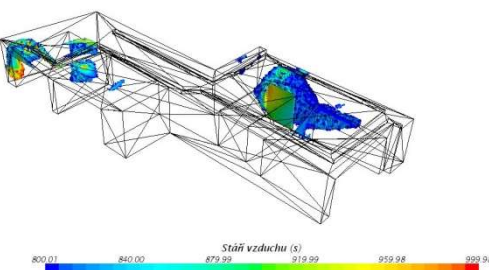
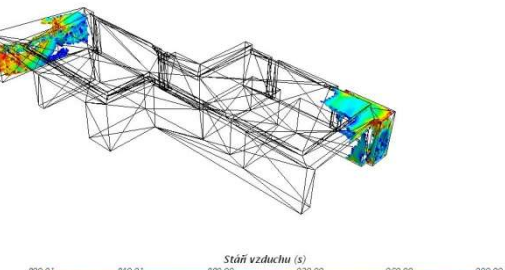
**Graf 6** Rozdíl objemových kritérií výměny vzduchu pro dvojici variant

Jak je vidět z grafu rozdílu objemových kritérií výměn vzduchu, hlavní změna se projevila v přesunu objemu vzduchu z kategorie výměny vzduchu 4,5-6 krát za hodinu do kategorie 6-9 krát za hodinu. Navýšení procentuálního zastoupení objemu u kategorie 6-9 h<sup>-1</sup> došlo o hodnotu 16,13% a v kategorii 4,5-6x h<sup>-1</sup> došlo k poklesu o hodnotu 15,06% lze tedy konstatovat, že významná část zlepšení pochází právě z této kategorie a došlo tak k zlepšení proudění v prostoru. Z výsledků je dále patrné, že se jedná o hodnotu blízkou předpokládané výměně vzduchu, která pro prostor byla stanovena na hodnotu 5h<sup>-1</sup> při výpočtu z celkového objemu a při zohlednění vlivu skladovacích regálů na hodnotu přibližně 7,5h<sup>-1</sup>.

Naopak je z grafu vidět, že došlo k navýšení zastoupení objemu vzduchu s nízkou výměnou. V první variantě se jednalo pouze o 1,55% objemu vzduchu s výměnou nižší než 3,6h<sup>-1</sup> ale v druhé variantě se toto zastoupení zvedlo na 3,3%. Toto navýšení znamená, že se v prostoru zvýšil objem vzduchu, který je hůře provětrávaný. Toto zhoršení ovšem není nikterak významné, protože maximální hodnota stáří vzduchu se stále nachází v méně než 0,07% objemu a hodnota nepřekročí 2178s, čemuž odpovídá výměna vzduchu 1,65h<sup>-1</sup>.

V tabulce 3 je přehledně zobrazen výstup ze simulačního programu, kdy je vidět konkrétní rozložené hodnoty pro jednotlivé výměny vzduchu ve dvojici variant. Je zde patrné, v kterém místě v depozitáři se nachází objem vzduchu s danou výměnou. Lze tak vyhodnocovat, v kterém místě v depozitáři hrozí zhoršení podmínek vnitřního prostředí.

**Tabulka 3** Grafické znázornění rozdílů objemového kritéria výměny vzduchu pro dvojici variant

Výměna [h <sup>-1</sup> ]	Zastoupení	Grafické znázornění první varianty	Zastoupení	Grafické znázornění druhé varianty
∞ - 18	1,31%		1,17%	
18 - 9	17,00%		16,74%	
9 - 6	52,01%		68,14%	
6 - 4,5	22,94%		7,87%	
4,5 - 3,6	5,96%		2,75%	



Výměna [h <sup>-1</sup> ]	Zastoupení	Grafické znázornění první varianty	Zastoupení	Grafické znázornění druhé varianty
3,6 - 3	0,72%	<p>Stáň vzduchu (s)</p> <p>1000.0 1040.0 1080.0 1120.0 1160.0 1200.0</p>	1,81%	<p>Stáň vzduchu (s)</p> <p>1000.0 1040.0 1080.0 1120.0 1160.0 1200.0</p>
3 - 2,6	0,76%	<p>Stáň vzduchu (s)</p> <p>1200.0 1240.0 1280.0 1320.0 1360.0 1400.0</p>	0,89%	<p>Stáň vzduchu (s)</p> <p>1200.0 1240.0 1280.0 1319.9 1359.9 1399.9</p>
2,6 - 2,3	0,05%	<p>Stáň vzduchu (s)</p> <p>1400.0 1440.0 1480.0 1519.9 1559.9 1599.9</p>	0,37%	<p>Stáň vzduchu (s)</p> <p>1400.0 1439.9 1479.9 1519.7 1559.6 1599.5</p>
2,3 - 2	0,02%	<p>Stáň vzduchu (s)</p> <p>1600.1 1640.0 1679.9 1719.9 1759.8 1799.7</p>	0,15%	<p>Stáň vzduchu (s)</p> <p>1600.2 1640.1 1680.1 1720.0 1760.0 1800.0</p>
2 - 1,8	0,01%	<p>Stáň vzduchu (s)</p> <p>1800.3 1845.8 1891.3 1936.9 1982.4 2027.9</p>	0,07%	<p>Stáň vzduchu (s)</p> <p>1800.2 1876.0 1951.8 2027.6 2103.4 2179.2</p>

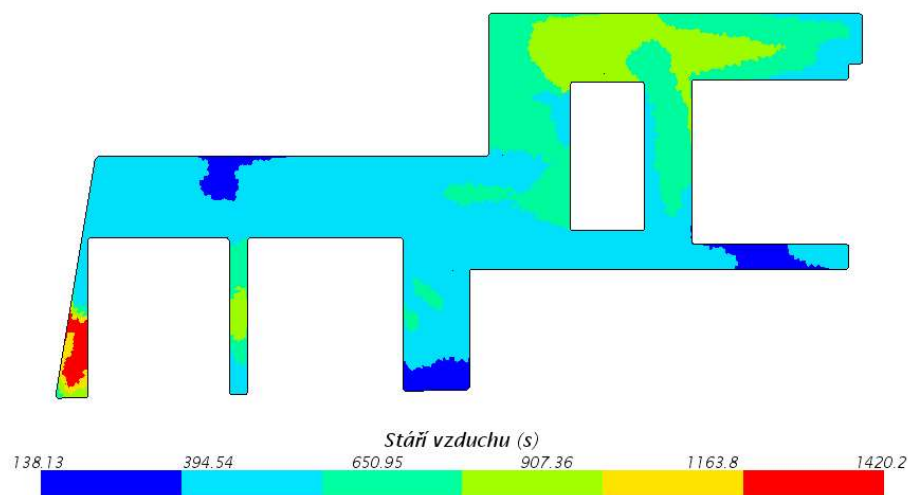
Z výše uvedených informací popisujících vlastnosti distribuce vzduchu pro původní návrh a pro nové vedení lze stanovit, že stávající systém distribuce vzduchu je vhodně navržen a splňuje kritéria pro prostor depozitáře ovlivnitelné distribucí vzduchu.

Druhá varianta vykazuje zlepšení kvality vnitřního prostředí pro skladování v depozitáři. Tento závěr je založen na pozorování navýšení objemového kritéria výměny vzduchu v kategorii s výměnou  $6 - 9\text{h}^{-1}$ . Naopak v kategorii s výměnou vzduchu  $4,5 - 6\text{h}^{-1}$  došlo k úbytku objemového kritéria výměny vzduchu. Je tedy patrné zlepšení vnitřního prostředí. Jak bylo dříve zmíněno, systém distribuce u druhé varianty uvažuje s drobnými úpravami na vybavení depozitáře.

Druhá varianta neslouží jako návrh opatření, ale spíše jako ukázka možného výsledku při odlišném způsobu distribuce. První varianta je navržena s minimálními zásahy do vybavení depozitáře a stále vytváří dobré obrazy proudění. Zajišťuje rovnoměrné provětrání místnosti depozitáře.

## 2.3 Sestavení mapy kvality prostředí v prostoru

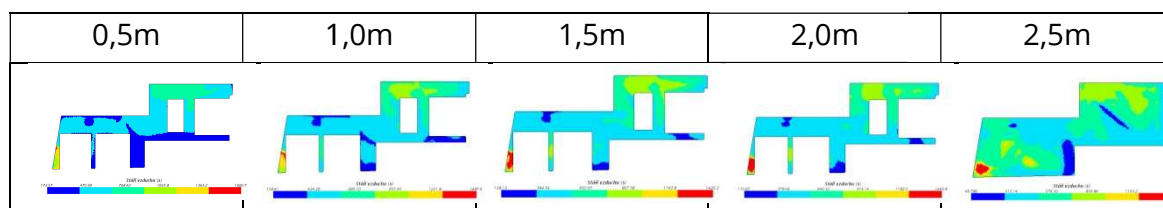
Díky sestavenému CFD modelu místnosti lze získat informaci o poloze rozložení objemů pro dané kategorie výměn vzduchu. Můžeme tedy určit míru nepříznivého vlivu na skladované archiválie v depozitáři. Lze stanovit, ve kterém místě není vhodné skladovat předměty více náchylné na změnu vnitřního prostředí. Výstupem může být mapa doporučující, ve kterých částech depozitáře skladovat různě náchylné druhy archiválií.



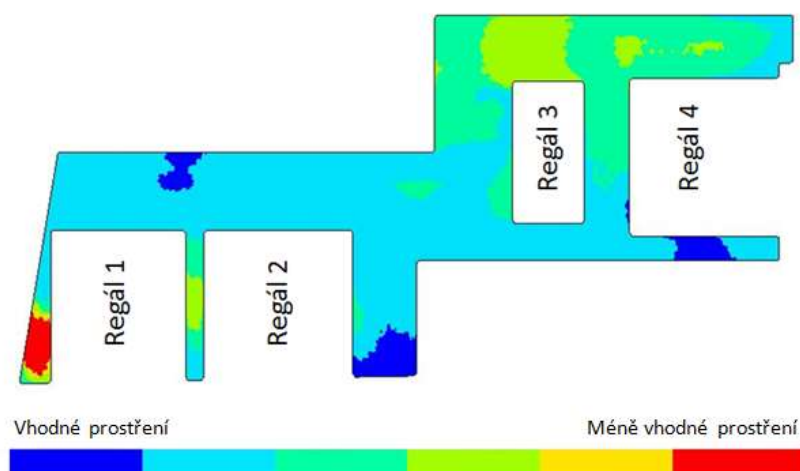
**Obrázek 39** Skalární průběh stáří vzduchu na vodorovném řezu s hrubším rozlišením hodnot

Na obrázku 39 je zobrazen příklad možného užití CFD modelu pro sestavení mapy kvality vnitřního prostředí. Byla provedena série pěti řezů v různých výškových úrovních a to v rozmezí mezi 0,5m a 2,5m nad úrovní podlahy.

**Tabulka 4** Porovnání vodorovných řezů v závislosti na výškové úrovni



Podle charakteru rozložení stáří vzduchu v jednotlivých výškových úrovních byl stanoven řez v úrovni 1,5m nad podlahou za charakterizující. Tento řez je i z pohledu ergonomie velice vhodný, protože výšková úroveň 1,5m je pro člověka vhodná pro vkládání předmětů do regálu bez nutnosti se ohýbat, nebo použít stoličku.



**Obrázek 40** Mapa prostředí prostoru depozitáře

Výsledná mapa prostředí depozitáře určuje, že regál 2 je v prostředí s nejvyšší kvalitou okolního vzduchu. Dále regály 3 a 4 jsou v prostředí s dobrou kvalitou vzduchu a regál 1 je z levé strany vystaven zhoršené kvalitě vnitřního prostředí, ale z pravé strany je prostředí shodné s regály 2,3 a 4.

Skladovací regály jsou v konkrétním případě zhotoveny jako posuvné. Charakter regálu přibližuje přiložená fotografie (viz obrázek 41)



**Obrázek 41** Fotografie charakterizující regály depozitáře - posuvné ústrojí

S regály je možno za použití trojramenných klik posouvat zhuba o jedenapůl násobek šířky regálu. Díky tomu vzniklá mezera mezi regály mění svoji polohu. Mezera mezi regálem 1 a 2 v mapě kvality prostředí může tedy měnit svou polohu. Z charakteru umístění přívodních výustek na protilehlé straně k regálům 1 a 2 lze předpokládat že kvalita prostředí v této mezeře se nebude výrazně měnit. Dále regál 3 a 4 může změnit polohu až k spodní stěně. Což může změnit mapu kvality prostředí.



Výsledné zhodnocení kvality úložných prostor pro skladování v depozitáři.

Kombinací poznatků technologie skladování a mapy kvality prostředí můžeme předpokládat tyto výstupy:

- Pravá část regálu 2.
  - Jedná se o krajní regál který není ovlivněn změnou polohy regálů a zůstává stále nezakryt a tak umožňuje udržovat stabilní prostředí okolního vzduchu okolo skladovaných předmětů. Kvalita okolního prostředí přilehlá k této straně regálu je velice dobrá. Tyto důvody určují tuto část jako nejvhodnější místo pro skladování.
- Horní část regálu 3 a 4
  - Jedná se o obdobný případ jako u předchozího bodu. Dobře provětrávaný regál, který není uzavřen pohybem regálů
- Střední části regálů 1,2,3 a 4
  - Pro tyto střední části je kvalita okolního prostředí dobrá, ale problém zde může způsobit déletrvající uzavření některých z částí regálů, a tak znemožnění přístupu okolního upravovaného vzduchu.
- Spodní části regálu 3 a 4
  - U těchto částí regálů jsou skladovací podmínky velice vhodné dle mapy kvality prostředí. Problém ovšem může nastat, pokud by se spodní části regálu přesunuly do těsné blízkosti spodní stěny. V tomto případě by bylo znemožněno proudění upraveného vzduchu okolo regálu a v kombinaci se zhoršenými podmínkami vlivem přilehlé stěny, by tyto regály mohly vykazovat zhoršení podmínek pro skladování.
- Levá část regálu 1
  - Tato část regálu je vystavena zhoršeným podmínkám dle mapy kvality prostředí. Jedná se zde o místo se zhoršeným prouděním okolo regálu. Může tak zde vzduch déle setrvat a tak negativně ovlivňovat skladované předměty.

Jednotlivé části skladovacích prostor byly sestupně seřazeny od místa s nejlepší kvalitou prostředí pro skladování až po tu nejméně vhodnou. Podle tohoto seznamu by se archiválie měly umísťovat do depozitáře podle významnosti. Z charakteru regálu vyplývá, že by se mezera mezi regály měla pravidelně měnit a tak umožnit proudění upravovaného vzduchu okolo obou stran u všech částí regálu. Důležité je nezapomínat na některou z částí, kde jsou dlouhodobě skladované předměty a prouděním vzduchu je ochránit před zhoršením kvality prostředí pro skladování.

## 2.4 Vliv změny průtoku vzduchu na kvalitu prostředí

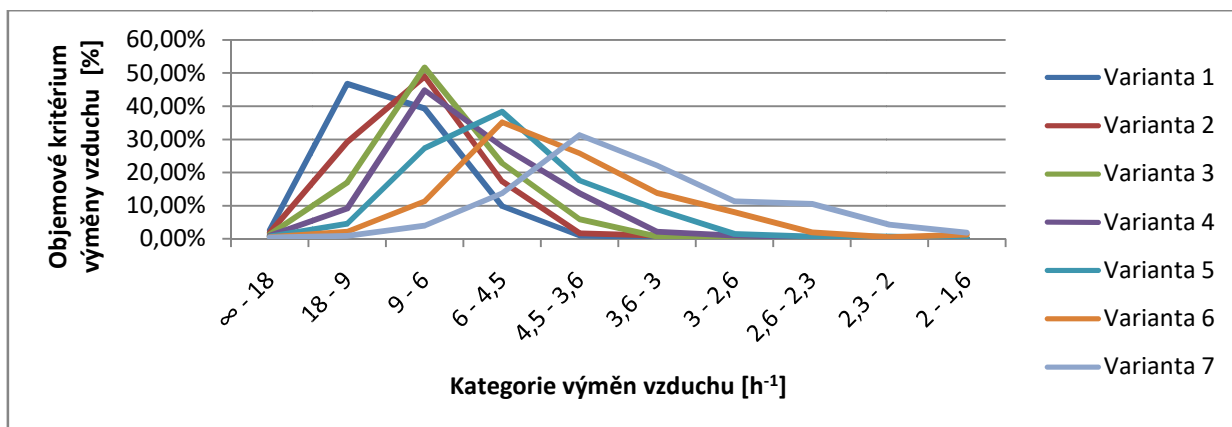
Dalším z užití CFD modelu je simulace změny objemového průtoku přiváděného vzduchu u stávající varianty a tak sledovat změnu stáří vzduchu. Ze změn stáří vzduchu následně určujeme výměnu vzduchu v depozitáři a změnu kvality vnitřního prostředí.

Výchozí varianta distribuce vzduchu byla rozdělena do sedmi variant podle změny objemového průtoku přivodního vzduchu. Výchozí varianta je zde jako Varianta 3. Původní varianta byla pozměněna na dvě nové s průtokem až o polovinu vyšším a čtyři nové s průtokem až polovičním. Krok průtoku jednotlivých variant je  $250\text{m}^3/\text{h}$ .

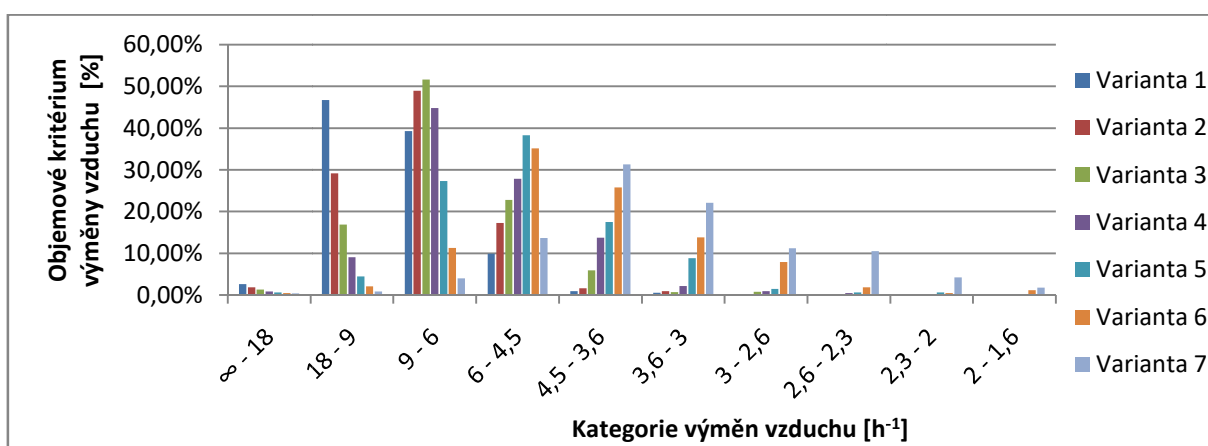
**Tabulka 5** Srovnání charakteristik variant při změně průtoků přiváděného vzduchu

Výměna vzduchu [ $\text{h}^{-1}$ ]	Varianta 1		Varianta 2		Varianta 3		Varianta 4		Varianta 5		Varianta 6		Varianta 7	
	Objem vzduchu dané výměny [ $\text{m}^3$ ]	Procentuální zastoupení objemu dané výměny [%]	Objem vzduchu dané výměny [ $\text{m}^3$ ]	Procentuální zastoupení objemu dané výměny [%]	Objem vzduchu dané výměny [ $\text{m}^3$ ]	Procentuální zastoupení objemu dané výměny [%]	Objem vzduchu dané výměny [ $\text{m}^3$ ]	Procentuální zastoupení objemu dané výměny [%]	Objem vzduchu dané výměny [ $\text{m}^3$ ]	Procentuální zastoupení objemu dané výměny [%]	Objem vzduchu dané výměny [ $\text{m}^3$ ]	Procentuální zastoupení objemu dané výměny [%]	Objem vzduchu dané výměny [ $\text{m}^3$ ]	Procentuální zastoupení objemu dané výměny [%]
8 - 18	7,03	2,63%	4,90	1,83%	3,49	1,30%	2,36	0,88%	1,73	0,65%	1,28	0,48%	0,93	0,35%
18 - 9	125	46,71%	78,1	29,18%	45	16,87%	24	9,08%	12,0	4,48%	5,56	2,08%	2,32	0,88%
9 - 6	105	39,26%	131	48,97%	138	51,60%	120	44,81%	73,2	27,34%	30,2	11,29%	10,5	3,96%
6 - 4,5	26,5	9,89%	46,3	17,28%	61	22,76%	75	27,83%	103	38,31%	94,0	35,12%	36,2	13,66%
4,5 - 3,6	2,56	0,96%	4,36	1,63%	15,8	5,92%	36,8	13,75%	46,9	17,51%	69,0	25,79%	83,0	31,30%
3,6 - 3	1,36	0,51%	2,51	0,94%	1,91	0,71%	5,81	2,17%	23,6	8,83%	36,9	13,81%	58,6	22,11%
3 - 2,6	0,07	0,03%	0,38	0,14%	2,01	0,75%	2,50	0,93%	3,90	1,46%	21,2	7,93%	29,8	11,23%
2,6 - 2,3	0,03	0,01%	0,05	0,02%	0,14	0,05%	1,35	0,50%	1,68	0,63%	4,99	1,86%	27,8	10,48%
2,3 - 2	0,01	0,00%	0,02	0,01%	0,04	0,02%	0,08	0,03%	1,71	0,64%	1,20	0,45%	11,18	4,22%
2 - 0,85	0,00	0,00%	0,00	0,00%	0,03	0,01%	0,03	0,01%	0,43	0,16%	3,18	1,19%	4,77	1,80%

Tabulka 5 je shrnutím výsledků zastoupení objemů vzduchu s výměnou v daných kategoriích. Kategorie byly použity shodné s předchozím porovnáváním dvojice různých distribucí vzduchu v místnosti. Jedná se o kategorie vycházející ze stáří vzduchu a každá kategorie je o šířce 200 s. Poslední kategorie 2 -  $0,85\text{h}^{-1}$  spojuje objem vzduchu se stářím vzduchu vyšším než 1800s.



**Graf 7** Spojnicový graf zastoupení objemového kritéria výměny vzduchu pro dané kategorie vyměň-ný vzduchu



**Graf 8** Sloupcový graf zastoupení objemového kritéria výměny vzduchu pro dané kategorie vyměň-ný vzduchu

Pro jednotlivé kategorie bylo stanoveno objemové kritérium výměny.

Z těchto procentuálních zastoupení byl sestaven graf 7 a 8. Tento graf přehledně znázorňuje změnu rozložení stáří vzduchu v objemu místnosti v závislosti na změně průtoku vzduchu. Graf byl sestaven ve dvou variantách zobrazení. První graf 7 je zhotoven jako spojnicový, na kterém je lépe vidět rozložení hodnot jednotlivých variant v celé škále výměn vzduchu respektive stáří vzduchu. Oproti tomu graf 8 je zhotoven jako graf sloupcový, který lépe ukazuje rozložení změny zastoupení objemu vzduchu dané kategorie stáří vzduchu.

Z grafů 7 a 8 je patrné předpokládané chování rozložení stáří vzduchu při změnách průtoků přiváděného vzduchu. Při zvyšování průtoku graf mění svou podobu tak, že se zužuje a posouvá se doleva. Což značí převládající objem vzduchu s vysokou výměnou. Naopak při snižování průtoku vzduchu se graf rozšiřuje a jeho maximum klesá a posouvá se doprava. To značí rovnoměrnější zastoupení objemů s různými

výměnami, rychlý pokles objemu s vysokou výměnou ale pozvolný nárůst objemů vzduchu s nízkou výměnou.

Předpokládaná výměna vzduchu pro jednotlivé kategorie je vypočtena z celkového objemu místnosti a množství přiváděného vzduchu dle vztahu 2.10.1. Jedná se o podíl přiváděného vzduchu s objemem místnosti.

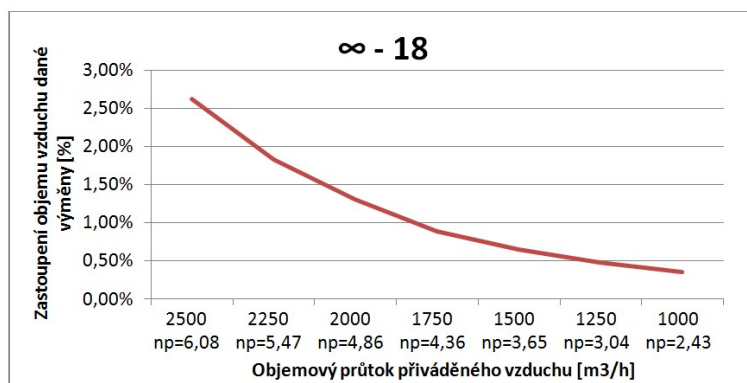
$$n_p = \frac{V_{\text{přiváděný}}}{V_{\text{místnosti}}} [\text{h}^{-1}] \quad (2.10.1)$$

Pro jednotlivé varianty je sestavena tabulka předpokládaných výměn vzduchu.

**Tabulka 6** Přehled předpokládaných výměn vzduchu pro jednotlivé varianty průtoků přiváděného vzduchu

	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3	Varianta 4	Varianta 5	Varianta 6	Varianta 7
Celkový průtok přiváděného vzduchu [m <sup>3</sup> /h]	2500	2250	2000	1750	1500	1250	1000
Předpokládaná výměna vzduchu [h <sup>-1</sup> ]	6,08	5,47	4,86	4,26	3,65	3,04	2,43

Dále byla sestavena odlišná interpretace výsledků, kdy byla zkoumána změna objemového kritéria výměny vzduchu jednotlivých kategorií na měnícím se objemovém průtoku přiváděného vzduchu. To je patrné na skupině grafů 9 až 18, které zastupují jednotlivé kategorie výměn vzduchu.

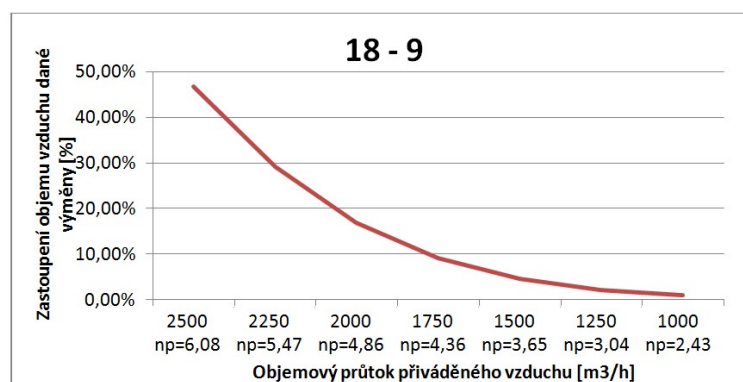


**Graf 9** Zastoupení objemů vzduchu s výměnou ∞ - 18 pro jednotlivé varianty průtoků vzduchu

Rychlý pokles objemu vzduchu v kategorii s výměnou vzduchu mezi ∞ - 18 h<sup>-1</sup> vyjadřuje rychle se měnící oblast objemu vzduchu s vysokou výměnou při snižování průtoku s konstantním krokem. Symbol nekonečno je zde pouze z důvodu zastou-

pení velkého čísla výměny vzduchu. To je dáno skutečností, že v těsné blízkosti u vyústek je stáří vzduchu s velmi malým číslem. Jedná se o číslo limitně blížící nule v těsné blízkosti u vyústky. Ze vztahu (2.2.2) je patrné, že při stáří vzduchu limitně blížícímu se k nule, bude výměna vzduchu se limitně blížit k nekonečnu.

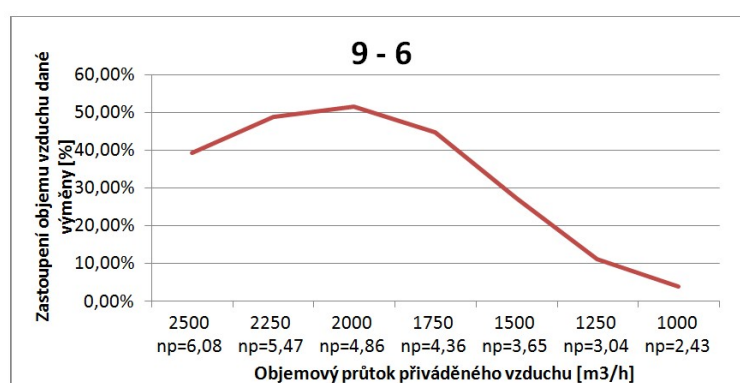
Obdobný případ se vyskytuje i pro kategorii s nižší výměnou vzduchu a to s výměnou od  $9-18h^{-1}$ .



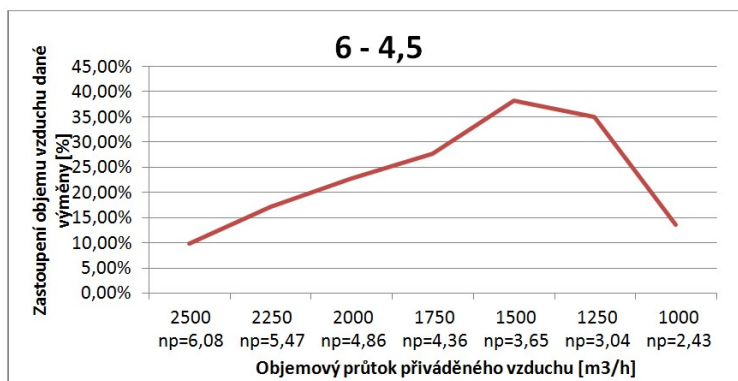
**Graf 10** Zastoupení objemů vzduchu s výměnou 18 - 9 pro jednotlivé varianty průtoků vzduchu

Charakter křivky je zde shodný, ovšem číselně se jedná o zastoupení o řád vyšších objemů. Tento jev se projevuje u kategorii výměn vzduchu výrazně vyšších než je předpokládaná výměna vzduchu v místnosti.

U dalších kategorií výměn vzduchu zjišťujeme rovnoměrnější rozdělení s maximem při průtoku vzduchu s předpokládanou výměnou blízkou výměně vzduchu dané kategorie.

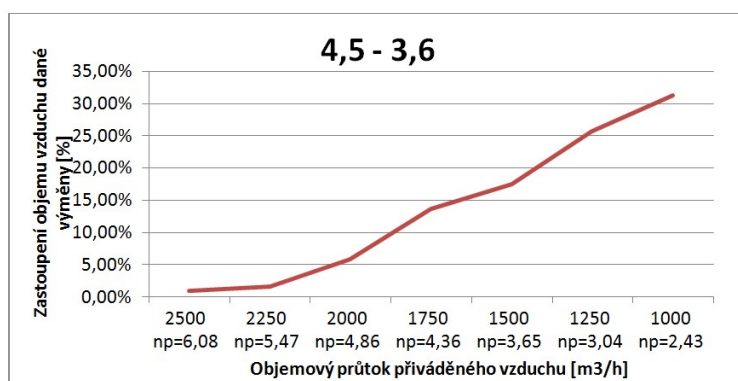


**Graf 11** Zastoupení objemů vzduchu s výměnou 9 - 6 pro jednotlivé varianty průtoků vzduchu

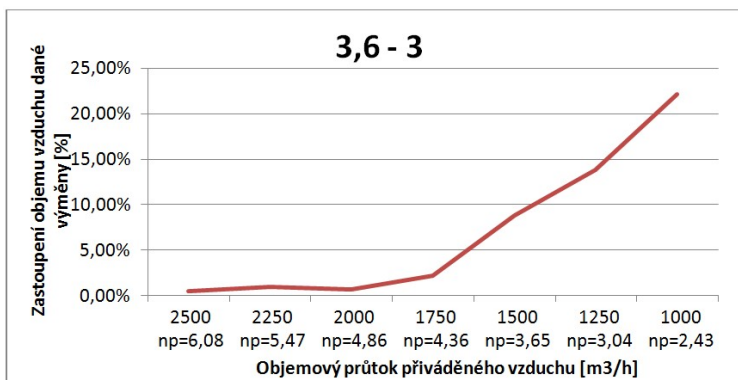


**Graf 12** Zastoupení objemů vzduchu s výměnou 6 - 4,5 pro jednotlivé varianty průtoků vzduchu

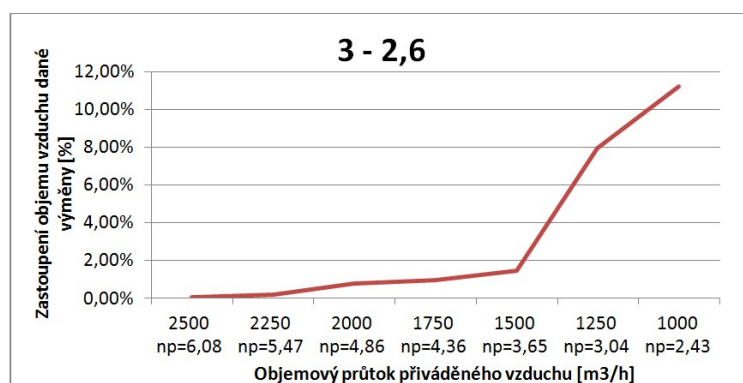
Třetí je skupina výměn vzduchu s výměnou nižší, než je předpokládaná výměna vzduchu v místnosti. U této kategorie je z grafu patrné rozložení s tendencí pozvolného nárůstu až velmi rychlého nárůstu. Tento jev závisí na tom, jak je vzdálena předpokládaná výměna vzduchu jednotlivých variant od hodnoty kategorie výměny vzduchu.



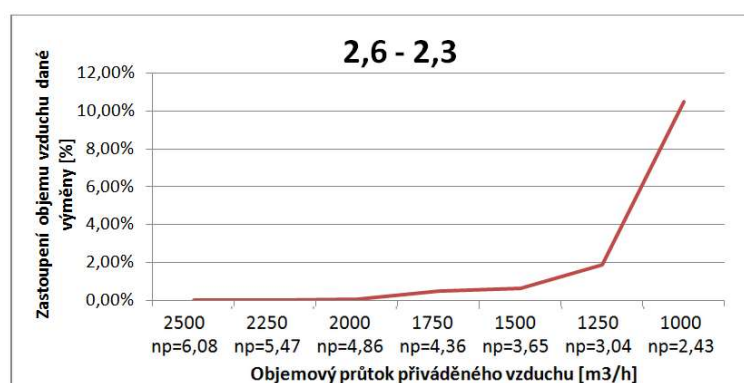
**Graf 13** Zastoupení objemů vzduchu s výměnou 4,5 - 3,6 pro jednotlivé varianty průtoků vzduchu



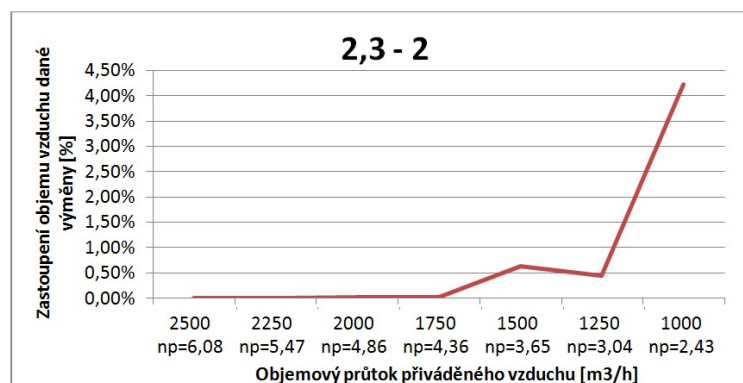
**Graf 14** Zastoupení objemů vzduchu s výměnou 3,6 - 3 pro jednotlivé varianty průtoků vzduchu



**Graf 15** Zastoupení objemů vzduchu s výměnou 3 - 2,6 pro jednotlivé varianty průtoků vzduchu



**Graf 16** Zastoupení objemů vzduchu s výměnou 2,6 - 2,3 pro jednotlivé varianty průtoků vzduchu



**Graf 17** Zastoupení objemů vzduchu s výměnou 2,3 - 2 pro jednotlivé varianty průtoků vzduchu



**Graf 18** Zastoupení objemů vzduchu s výměnou 2 - 1,6 pro jednotlivé varianty průtoků vzduchu

## Celkové shrnutí

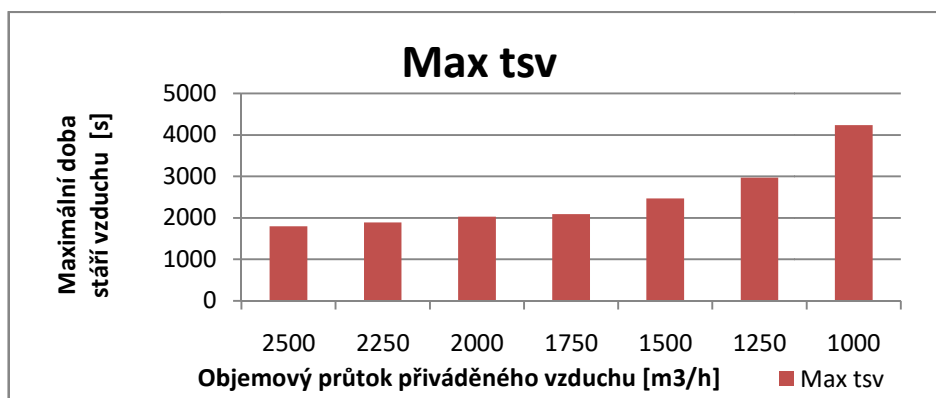
Z výše uvedených grafů je patrná tendence lineárního rozložení pro varianty s předpokládanou hodnotou výměny vzduchu srovnatelnou s výměnou vzduchu dané kategorie. Což tedy znamená, že tendence lineárního rozložení je u grafu kategorie výměny  $6-4,5h^{-1}$  pro variantu s průtokem vzduchu  $2500-2000m^3/h$ . Graf kategorie výměny  $4,5-3,6h^{-1}$  je lineární téměř v celém rozsahu, hlavně pro varianty s průtokem vzduchu  $1750-1500m^3/h$ . Graf kategorie výměny  $3,6-3,0h^{-1}$  je lineární pro varianty  $1500-1250m^3/h$ .

Pro graf kategorie výměny  $3,0-2,6h^{-1}$  je již patrný rychlý nárůst zastoupení objemového kritéria výměny vzduchu u variant se snižujícím se objemovým průtokem přivodního vzduchu. Toto lze pozorovat i u dalších grafů, kdy pro varianty s vyšší předpokládanou výměnou vzduchu než je kategorie výměny, mají obdobný charakter rychlého poklesu.

Opačný jev je pozorovatelný u grafů s vysokou hodnotou výměn vzduchu. Tam lze pozorovat rychlý pokles zastoupení objemového kritéria výměny vzduchu pro varianty se snižujícím se objemovým průtokem přivodního vzduchu.



Pro jednotlivé varianty průtoků přiváděného vzduchu, byla zjištěna maximální doba stáří vzduchu vyskytující se v místnosti.



**Graf 19** Přehled maximální doby stáří vzduchu pro jednotlivé varianty

Z grafu maximálního času stáří vzduchu je patrná závislost stáří vzduchu na množství přiváděného průtoku vzduchu v jednotlivých variantách. Maximální doba stáří vzduchu vzrůstá se snižujícím se objemovým průtokem přivodního vzduchu. Charakter změny maximální doby stáří vzduchu nevypovídá o změně kvality prostředí. Jedná se pouze o sledování zhoršování místa s nejhorší výměnou, která ve výsledku zabírá jen nepatrnou část místnosti. Posouzení objemového kritéria výměny vzduchu je tedy mnohem lépe vypovídající a objektivnější posouzení zahrnující změnu zastoupení objemů vzduchu s různým stářím vzduchu.

### 3 ZÁVĚR

Výsledkem diplomové práce je zjištění, že systém distribuce vzduchu pro prostor depozitáře je vhodně navržen. V místnosti je zajištěn požadavek na maximální rychlost proudění vzduchu dle doporučení Národní knihovny České republiky. Výměna vzduchu v depozitáři je dostatečná a nevykazuje místa s výrazně navýšenou dobou stáří vzduchu. Kritické místo v depozitáři, které dosahuje největší doby stáří vzduchu, je zastoupeno pouhým 0,83% objemu místnosti a dosahuje výměny vzduchu v rozmezí od 1,8 do  $3\text{h}^{-1}$ . Toto kritické místo stále svou výměnou vzduchu dosahuje přijatelných hodnot a dvojnásobně převyšuje doporučenou hodnotu  $0,7\text{h}^{-1}$  pro prostory s vyšší kvalitou vnitřního vzduchu dle ČSN EN 15251. [2]

Návrhem změny distribuce vzduchu došlo ke zlepšení vnitřního prostředí, ale za předpokladu dispozičních změn vybavení a mírného prodražení VZT systému o čtyřhranné potrubí a změnu počtu a rozměrů distribučních elementů.

Sestavením mapy kvality prostředí bylo popsáno doporučení, ve kterých místech skladovat různé druhy archiválií a kde je vhodné skladovat archiválie s vyššími nároky na vnitřní prostředí.

Závěrem bylo stanoveno měnící se zastoupení objemových kritérií výměn vzduchu pro jednotlivé kategorie výměn vzduchu při změně objemového průtoku přiváděného vzduchu. Byl zde popsán předpokládaný jev nárůstu objemu vzduchu s vyšší výměnou při navyšování průtoku a nárůst objemu vzduchu s nižší výměnou při poklesu objemu průtoku přiváděného vzduchu. Přínosem bylo pozorování trendu vývoje zastoupení objemu vzduchu daných kategorií výměn vzduchu. Pozvolné změny nastávají u kategorií blízkých předpokládané výměně vzduchu. Oproti tomu u kategorií vzduchu vzdálených od předpokládané výměny vzduchu se jedná o strmé změny hodnot.

## 4 POUŽITÉ ZDROJE

### ***Zákony, vyhlášky, normy směrnice***

1. Nařízení vlády č. 361/2007 Sb. kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci
2. ČSN EN 15251 Vstupní parametry vnitřního prostředí pro návrh a posouzení energetické náročnosti budov s ohledem na kvalitu vnitřního vzduchu, tepelného prostředí, osvětlení a akustiky

### ***Tištěné zdroje***

3. JŮZA Štěpán, *Mikroklima a vzduchotechnika prostoru depozitáře*. Brno, 2015. 94 s., 3 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební,
4. Ústav technických zařízení budov. Vedoucí práce doc. Ing. Aleš Rubina, Ph.D
5. SZÉKYOVÁ, Marta, Karol FERSTL a Richard NOVÝ. *Větrání a klimatizace*. Bratislava: JAGA GROUP, 2006. ISBN 80-8076-037-3.
6. GEBAUER, Günter, Olga RUBINOVÁ a Helena HORKÁ. *Vzduchotechnika*. Brno: ERA, 2005. Technická knihovna (ERA). ISBN 80-7366-027-X.

### ***Elektronické zdroje***

7. ADAMOVSKEÝ, Daniel. *ESB 2 Distribuce a proud ě ní vzduchu v Distribuce a proud ě ní vzduchu v interiéru interiéru* [online]. Praha [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <http://tzb.fsv.cvut.cz/files/vyuka/125es2/prednasky/125es2-02.pdf>
8. JANOTKOVA, Eva. *TECHNIKA PROSTŘEDÍ* [online]. Brno: VYSOKÉ U ČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ ODBOR TERMOMECHANIKY A TECHNIKY PROSTŘEDÍ EÚ, 2010 [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/vyuka/technikaprostredi/SylabyTP6.pdf>
9. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Newtonovy pohybové zákony* [online]. [cit. 2017-01-02]. Dostupný z WWW: [https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Newtonovy\\_pohybové\\_zákony&oldid=14256149](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Newtonovy_pohybové_zákony&oldid=14256149)
10. Příspěvatelé Wikipedie, *Proudění* [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, , Datum poslední revize 27. 07. 2016, 15:04 UTC, [cit. 2017-01-02] Dostupný z <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Proudění&oldid=13969576>
11. RUBINOVÁ, Olga. *CT05 EXPERIMENTÁLNÍ METODY DISTRIBUCE VZDUCHU* [online]. Brno: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ ÚSTAV TECHNICKÉHO ZAŘÍZENÍ BUDOV, 2016 [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: [http://www.fce.vutbr.cz/TZB/rubinova.o/exper\\_soubory/ExpMet\\_2.pdf](http://www.fce.vutbr.cz/TZB/rubinova.o/exper_soubory/ExpMet_2.pdf)
12. RUBINOVÁ, Olga. *AT 02 TZB II a technická infrastruktura 8. Přednáška: Proudění vzduchu Nucené větrání* [online]. Brno: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ ÚSTAV TECHNICKÉHO ZAŘÍZENÍ BUDOV, 2012 [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: [http://www.fce.vutbr.cz/TZB/rubinova.o/prednasky/A\\_VZT%2008\\_09.pdf](http://www.fce.vutbr.cz/TZB/rubinova.o/prednasky/A_VZT%2008_09.pdf)

**Obrazové zdroje**

13. TKANINOVÉ POTRUBÍ A VYÚSTKY - Technické podklady. *PŘÍHODA s.r.o.* [online]. Hlinsko: PŘÍHODA, 2016 [cit. 2017-01-02].  
Dostupné z: [http://www.prihoda.com/userfiles/dokumenty/technicke\\_podklady\\_cz.pdf](http://www.prihoda.com/userfiles/dokumenty/technicke_podklady_cz.pdf)
14. SYSTEMAIR, a.s. - Katalog výrobků. *Systemair, a.s.* [online]. Švédsko 2016 [cit. 2017-01-02].  
Dostupné z: <https://www.systemair.com/cz/Ceska/>
15. GEBAUER, Günter, Olga RUBINOVÁ a Helena HORKÁ. *Vzduchotechnika*. Brno: ERA, 2005. Technická knihovna (ERA). ISBN 80-7366-027-X.
16. RUBINOVÁ, Olga. *AT 02 TZB II a technická infrastruktura 8. Přednáška: Proudění vzduchu Nucené větrání* [online]. Brno: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ ÚSTAV TECHNICKÉHO ZAŘÍZENÍ BUDOV, 2012 [cit. 2017-01-02].  
Dostupné z: [http://www.fce.vutbr.cz/TZB/rubanova.o/prednasky/A\\_VZT%2008\\_09.pdf](http://www.fce.vutbr.cz/TZB/rubanova.o/prednasky/A_VZT%2008_09.pdf)
17. RUBINOVÁ, Olga. *CT05 EXPERIMENTÁLNÍ METODY DISTRIBUCE VZDUCHU* [online]. Brno: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ ÚSTAV TECHNICKÉHO ZAŘÍZENÍ BUDOV, 2016 [cit. 2017-01-02].  
Dostupné z: [http://www.fce.vutbr.cz/TZB/rubanova.o/exper\\_soubory/ExpMet\\_2.pdf](http://www.fce.vutbr.cz/TZB/rubanova.o/exper_soubory/ExpMet_2.pdf)

## 5 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A OZNAČENÍ

### *Zkratky*

VZT – vzduchotechni(ka) cký

CFD – Computational Fluid Dynamics neboli výpočetní dynamika tekutin

### *Fyzikální veličiny*

$t_{sv}$  – doba stáří vzduchu

$n$  – výměna vzduchu [ $h^{-1}$ ]

$n_p$  – předpokládaná výměna vzduchu

$V_{přiváděný}$  – objemový průtok přiváděného vzduchu [ $m^3/h$ ]

$V_{místnosti}$  – objemový místnosti [ $m^3$ ]

$m$  – hmotnost [kg]

$t$  – čas [s], teplota [ $^{\circ}C$ ]

$v$  – rychlost [m/s]

$\rho_t$  – hustota [ $kg/m^3$ ]

$S$  – plocha [ $m^2$ ]

## 6 SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ

### Obrázky

<b>Obrázek 1</b> Ukázka distribučního elementu dýza umístěného na stěně .....	14
<b>Obrázek 2</b> Ukázka distribučního elementu štěrbinová výústka .....	14
<b>Obrázek 3</b> Ukázka kouřové zkoušky štěrbinové výústky se znázorněním vystupujícího proudu vzduchu.....	15
<b>Obrázek 4</b> Ukázka čtyřhranné klapky se zdvojenou regulací - realizováno v prostoru depozitáře .....	15
<b>Obrázek 5</b> Ukázka distribučního elementu vířivý anemostat .....	16
<b>Obrázek 6</b> Možnosti nastavení přívodních lamel pro nasměrování proudu vzduchu - radiální / kompaktní proud	16
<b>Obrázek 7</b> Ukázka kouřové zkoušky vířivého anemostatu pro přívod studeného a teplého vzduchu .....	17
<b>Obrázek 8</b> schematické znázornění radiálního proudu vzduchu vystupujícího z vířivého anemostatu .....	17
<b>Obrázek 9</b> Ukázka distribučního elementu velkoobjemová výústka .....	18
<b>Obrázek 10</b> Schema způsobu distribuce velkoobjemové výústky - zaplavování .....	18
<b>Obrázek 11</b> Ukázka distribučního elementu textilní výústka.....	18
<b>Obrázek 12</b> Ukázka způsobu distribuce vzduchu u textilních výústí .....	19
<b>Obrázek 13</b> Ukázka kouřové zkoušky pro různé způsoby distribuce vzduchu u textilní výústí .....	19
<b>Obrázek 14</b> Detail kouřové zkoušky textilní výústí.....	19
<b>Obrázek 15</b> Ukázka obrazu proudění z textilní výústky pro režim topení / chlazení.....	20
<b>Obrázek 16</b> Schema proudění s radiálním výstupem vzduchu s vlivem Coandova jevu přiřnutí proudu vzduchu ..	22
<b>Obrázek 17</b> Schéma vlivu geometrie místnosti na proudění vzduchu .....	22
<b>Obrázek 18</b> Schéma obrazu proudění pro ohraničený proud s vlivem zpětných proudů.....	22
<b>Obrázek 19</b> Ukázka výstupu CFD modelu pro místnosti s výústkami u stropu - patrný vliv zpětných proudů .....	23
<b>Obrázek 20</b> Schéma oblastí volného izotermního proudu včetně znázornění poklesu rychlosti.....	24
<b>Obrázek 21</b> Schéma způsobu měření rychlostí vzduchu pro popis proudu .....	27
<b>Obrázek 22</b> Ukázka kouřové zkoušky pro obdélníkovou výústku určenou do podlahy .....	27
<b>Obrázek 23</b> Příklad empirického stanovení rychlosti proudu vzduchu v zóně pobytu zjednodušeným výpočtem..	28
<b>Obrázek 24</b> Schéma pro empirické stanovení rozmístění a druhu distribučních elementů .....	28
<b>Obrázek 25</b> Ukázka průběhu výpočtu CFD modelu - průběh reziduí se zaznačenou mezí pro ukončení výpočtu...	30
<b>Obrázek 26</b> Síťový model místnosti depozitáře .....	34
<b>Obrázek 27</b> Fotografie přibližující charakter skladovacích regálů.....	34
<b>Obrázek 28</b> Síťový model po odečtu objemu ragálu .....	35
<b>Obrázek 29</b> Vzniklý model s přiznanými plochami .....	35
<b>Obrázek 30</b> Model s vyznačením výpočetních elementů.....	36
<b>Obrázek 31</b> Řez modelem s vyznačením výpočetních elementů.....	36
<b>Obrázek 32</b> Detail řezu modelem - patrné zavedení mezní vrstvy.....	36
<b>Obrázek 33</b> Ukázka rozložení rychlostí přiváděného vzduchu pro různé okrajové podmínky .....	37
<b>Obrázek 34</b> Skalární pole stárí vzduchu vyznačené na ekvidistančních řezech modelem.....	39
<b>Obrázek 35</b> Model první varianty z vyznačeným objemem vzduchu s rychlostí vyšší než 0,5 m/s.....	40
<b>Obrázek 36</b> Model druhé varianty z vyznačeným objemem vzduchu s rychlostí vyšší než 0,5 m/s .....	41
<b>Obrázek 38</b> Ukázka porovnání stárí vzduchu pro dvojici variant na ekvidistančních řezech.....	43
<b>Obrázek 37</b> Ukázka půdorysů systému VZT pro dvojici variant.....	43
<b>Obrázek 39</b> Skalární průběh stárí vzduchu na vodorovném řezu s hrubším rozlišením hodnot .....	49
<b>Obrázek 40</b> Mapa prostředí prostoru depozitáře.....	50
<b>Obrázek 41</b> Fotografie charakterizující regály depozitáře - posuvné ústrojí.....	50



## **Tabulky**

<b>Tabulka 1</b> Porovnání dvojice variant distribuce vzduchu pro prostor depozitáře .....	42
<b>Tabulka 2.1</b> Vyčíslení objemového kritéria výměny vzduchu pro jednotlivé kategorie výměn vzduchu .....	44
<b>Tabulka 3</b> Grafické znázornění rozdílů objemového kritéria výměny vzduchu pro dvojici variant .....	46
<b>Tabulka 4</b> Porovnání vodorovných řezů v závislosti na výškové úrovni .....	49
<b>Tabulka 5</b> Srovnání charakteristik variant při změně průtoků přiváděného vzduchu .....	52
<b>Tabulka 6</b> Přehled předpokládaných výměn vzduchu pro jednotlivé varianty průtoků přiváděného vzduchu .....	54

## **Grafy**

<b>Graf 1</b> Závislost hustoty vzduchu na teplotě .....	20
<b>Graf 2</b> Popis výškové úrovně osy proudu pro neizotermní proudění .....	26
<b>Graf 3</b> Popis průběhu rychlosti proudu pro neizotermní proudění .....	26
<b>Graf 4</b> Popis průběhu teploty v ose proudu pro neizotermní proudění .....	26
<b>Graf 5</b> Objemové kritérium výměny vzduchu jednotlivých kategorií výměn vzduchu .....	44
<b>Graf 6</b> Rozdíl objemových kritérií výměny vzduchu pro dvojici variant .....	45
<b>Graf 7</b> Spojnicový graf zastoupení objemového kritéria výměny vzduchu pro dané kategorie vyměňovaný vzduchu .....	53
<b>Graf 8</b> Sloupcový graf zastoupení objemového kritéria výměny vzduchu pro dané kategorie vyměňovaný vzduchu .....	53
<b>Graf 9</b> Zastoupení objemů vzduchu s výměnou $\infty$ - 18 pro jednotlivé varianty průtoků vzduchu .....	54
<b>Graf 10</b> Zastoupení objemů vzduchu s výměnou 18 - 9 pro jednotlivé varianty průtoků vzduchu .....	55
<b>Graf 11</b> Zastoupení objemů vzduchu s výměnou 9 - 6 pro jednotlivé varianty průtoků vzduchu .....	55
<b>Graf 12</b> Zastoupení objemů vzduchu s výměnou 6 - 4,5 pro jednotlivé varianty průtoků vzduchu .....	56
<b>Graf 13</b> Zastoupení objemů vzduchu s výměnou 4,5 - 3,6 pro jednotlivé varianty průtoků vzduchu .....	56
<b>Graf 14</b> Zastoupení objemů vzduchu s výměnou 3,6 - 3 pro jednotlivé varianty průtoků vzduchu .....	56
<b>Graf 15</b> Zastoupení objemů vzduchu s výměnou 3 - 2,6 pro jednotlivé varianty průtoků vzduchu .....	57
<b>Graf 16</b> Zastoupení objemů vzduchu s výměnou 2,6 - 2,3 pro jednotlivé varianty průtoků vzduchu .....	57
<b>Graf 17</b> Zastoupení objemů vzduchu s výměnou 2,3 - 2 pro jednotlivé varianty průtoků vzduchu .....	57
<b>Graf 18</b> Zastoupení objemů vzduchu s výměnou 2 - 1,6 pro jednotlivé varianty průtoků vzduchu .....	58
<b>Graf 19</b> Přehled maximální doby stárí vzduchu pro jednotlivé varianty .....	59

# **PŘÍLOHY**

**01 - TECHNICKÝ POPIS VARIANT**

**02 - PŮDORYS 1.PP první varianta**

**03 - PŮDORYS 1.PP druhá varianta**